

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **DIPLOMSKI RAD**

Krešimir Meštrović

Zagreb, 2011.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

**DIPLOMSKI RAD**  
ISPITIVANJE SIMETRIČNOSTI  
OPTEREĆENJA REFERENTNOG  
ETALONA SILE

Voditelj rada:

Doc.dr.sc. Danko Ćorić

Krešimir Meštrović

Zagreb, 2011.

## SAŽETAK

Za različite točnosti mjerenja sile koriste se različiti mjerni sustavi. Korištenje pravilnih tehnika mjerenja i uređaja preduvjet je za pouzdano i točno mjerenje. Uređaji na kojima se provodi mjerenje moraju biti umjereni da bi pružili zadovoljavajuću kvalitetu mjerenja. To znači da moraju biti „uspoređeni“ s nekim točnijim mjerilom veće mjeriteljske kvalitete.

Kod ispitivanja mjerila sile posrednički etaloni koji se koriste pri umjeravanju podvrgnuti su određenim uvjetima koji tijekom vremena dovode do promjena njihovih mjeriteljskih karakteristika.

U ovom radu obrađeni su posrednički etaloni sile koji služe umjeravanju referentnog etalona, te je ukratko prikazan princip njihova rada kao i postupak umjeravanja sukladno normi EN ISO 376. Također opisan je referentni etalon sile koji se koristi za umjeravanje prijenosnih etalona koji se rabe kod umjeravanja kidalica. Osim toga, istaknut je općeniti značaj umjeravanja mjerila s posebnim osvrtom na osiguranje mjerne sljedivosti.

Jedan od značajnih parametara sljedivosti rezultata mjerenja sile je i mjerna nesigurnost te je u ovom radu objašnjen pojam i značaj mjerne nesigurnosti kao i način njene procjene kod umjeravanja posredničkih etalona.

U eksperimentalnom dijelu provedena su umjeravanja posredničkog etalona sile tipa Z4A nazivne vrijednosti 500 kN. Umjeravanja, sukladno normi EN ISO 376, provedena su na referentnom etalonu sile koji se nalazi u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanja su načinjena za različite ugradbene položaje posredničkog etalona tako da se on nalazio u centru aksijalne osi opterećenja te izmaknut od osi za 60 mm u x i y smjeru. Na taj način željela se analizirati simetričnost opterećenja na referentnom etalonu sile, te indirektno njen utjecaj na karakteristične pogreške posredničkog etalona. Rezultati mjerenja detaljno su obrađeni i analizirani temeljem čega su doneseni odgovarajući zaključci.

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA .....	IV
IZJAVA .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. POGREŠKE MJERNOG SUSTAVA .....	3
3. MJERNA NESIGURNOST .....	4
3.1. Općenito.....	4
3.1.1. Procjena standardne mjerne nesigurnosti .....	4
4. SLJEDIVOST MJERENJA I ZNAČAJ UMJERAVNJA .....	9
4.1. Sljedivost mjerenja .....	9
4.1.1 Osiguranje sljedivosti mjerenja .....	10
4.2. Umjeravanje.....	12
4.2.1. Hijerarhija umjeravanja .....	14
5. ETALONI SILE .....	16
5.1. Referentni etalon.....	16
5.2. Posrednički etalon.....	17
5.2.1. Elektrootpornički tenzometri (mjerne trake) .....	19
5.2.2. Mjerenje u spoju Wheatstoneovog mjernog mosta.....	24
5.2.3. Mjerno pojačalo .....	28
5.2.3.1. Filtriranje signala.....	29
5.2.3.2. Niskopropusni filter .....	29
5.2.3.3. Visokopropusni filter .....	30
5.2.3.4. Pojasno propusni filter .....	30
5.2.3.5. Pojasno nepropusni filter .....	31
5.2.3.6. Uskopojasni filter .....	31
6. UMJERAVANJE POSREDNČKIH ETALONA SILE PREMA NORMI EN ISO 376 .....	33
6.1. Općenito.....	33
6.2. Priprema za umjeravanje .....	33
6.3. Rezolucija .....	34
6.4. Minimalna sila .....	35
6.5. Postupak umjeravanja.....	35
6.6. Kriteriji ocjenjivanja.....	37

6.7. Klasifikacija etalona .....	39
6.8. Potvrda o umjeravanju .....	40
6.9. Primjena umjerenih etalona .....	40
6.10. Procjena mjerne nesigurnosti kod umjeravanja posredničkih etalona.....	41
7. EKSPERIMENTALNI DIO .....	45
7.1. Plan eksperimenta.....	45
7.2. Karakteristike referentnog etalona sile .....	46
7.3. Karakteristike posredničkog etalona sile .....	48
7.4. Rezultati umjeravanja i analiza rezultata .....	49
8. ZAKLJUČAK.....	75
9. LITERATURA .....	76
PRILOG I. Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN za položaj A.....	77
PRILOG II. Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN za položaj B .....	78
PRILOG III. Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN za položaj C .....	79
PRILOG IV. Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN za položaj D.....	80

## POPIS SLIKA

Slika 1. Lanac mjerne sljedivosti .....	10
Slika 2. Referentni etalon sile .....	11
Slika 3. Piramida sljedivosti mjerila sile .....	12
Slika 4. Hijerarhija umjeravanja.....	13
Slika 5. Akreditacija LIMS-a.....	14
Slika 6. Dinamometar .....	17
Slika 7. Mjerno pojačalo.....	17
Slika 8. Tipovi dinamometara .....	18
Slika 9. Dijagram naprezanje – istezanje za niskougljični čelik .....	19
Slika 10. Deformacija žice pod djelovanjem opterećenja .....	20
Slika 11. Različiti tipovi elektrootporničkih mjernih traka i rozeta .....	22
Slika 12. Lijepljenje mjerne trake na ispitni objekt.....	23
Slika 13. Vrste mjernih rozeta .....	24
Slika 14. Wheatstoneov mjerni most.....	25
Slika 15. Tenzometri (mjerne trake) u spoju punog mjernog mosta i primjer uporabe .....	26
Slika 16. Tenzometri (mjerne trake) u spoju polu-mosta i primjeri uporabe .....	27
Slika 17. Tenzometarska (mjerna traka) u spoju četvrtinskog mosta i primjer uporabe .....	27
Slika 18. Uporaba kompenzacijske mjerne trake .....	28
Slika 19. Frekvencijska karakteristika niskopropusnog filtra .....	30
Slika 20. Frekvencijska karakteristika visokopropusnog filtra .....	30
Slika 21. Frekvencijska karakteristika pojasno propusnog filtra.....	31
Slika 22. Frekvencijska karakteristika pojasno nepropusnog filtra.....	31
Slika 23. Frekvencijska karakteristika uskopojasnog filtra .....	32
Slika 24. Položaj dinamometra pri umjeravanju .....	36
Slika 25. Pozicije dinamometra Z4A/500 kN .....	45
Slika 26. Referentni etalon sile u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva .....	46
Slika 27. Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona sile.....	47
Slika 28. Dinamometar Z4A/500 kN.....	48
Slika 29. Mjerno pojačalo DMP40 .....	48
Slika 30. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 50 kN .....	51
Slika 31. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 100 kN .....	51
Slika 32. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 150 kN .....	52
Slika 33. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 200 kN .....	52

Slika 34. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 250 kN ....	53
Slika 35. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 300 kN.....	53
Slika 36. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 350 kN.....	54
Slika 37. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 400 kN.....	54
Slika 38. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 450 kN.....	55
Slika 39. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 500 kN.....	55
Slika 40. Razlika signala na položaju A i centru za rastuće nizove sa i bez rotacije .....	57
Slika 41. Razlika signala na položaju B i centru za rastuće nizove sa i bez rotacije .....	57
Slika 42. Razlika signala na položaju C i centru za rastuće nizove sa i bez rotacije .....	58
Slika 43. Razlika signala na položaju D i centru za rastuće nizove sa i bez rotacije .....	58
Slika 44. Razlika signala u odnosu na centar za sva četiri položaja, rastući nizovi bez rotacije .....	59
Slika 45. Razlika signala u odnosu na centar za sva četiri položaja, rastući nizovi sa rotacijom ....	59
Slika 46. Razlika signala u odnosu na referentne vrijednosti za svih pet ispitnih položaja i rastuće nizove bez rotacije.....	61
Slika 47. Razlika signala u odnosu na referentne vrijednosti za svih pet ispitnih položaja i rastuće nizove sa rotacijom .....	61
Slika 48. Razlika signala na položaju A i centru za padajuće nizove .....	63
Slika 49. Razlika signala na položaju B i centru za padajuće nizove .....	63
Slika 50. Razlika signala na položaju C i centru za padajuće nizove .....	64
Slika 51. Razlika signala na položaju D i centru za padajuće nizove .....	64
Slika 52. Razlika signala u odnosu na centar za sva četiri položaja, padajući nizovi .....	65
Slika 53. Razlika signala u odnosu na referentne vrijednosti za svih pet ispitnih položaja, padajući nizovi .....	66
Slika 54. Relativna pogreška ponovljivosti u nizovima bez rotacije .....	71
Slika 55. Relativna pogreška obnovljivosti u nizovima sa rotacijom .....	72
Slika 56. Relativno interpolacijsko odstupanje .....	72
Slika 57. Relativna pogreška histereze .....	73
Slika 58. Mjerna nesigurnost .....	74

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Vrijednosti mjerne sposobnosti referentnih etalona .....	17
Tablica 2.	Materijali mjernih traka .....	22
Tablica 3.	Maksimalno dozvoljena razlika srednjih očitavanja .....	34
Tablica 4.	Karakteristike etalona sile .....	40
Tablica 5.	Sastavnice nesigurnosti.....	42
Tablica 6.	Karakteristike referentnog etalona sile .....	47
Tablica 7.	Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u centru .....	49
Tablica 8.	Rezultati umjeravanja za dinamometar u centru .....	49
Tablica 9.	Srednje vrijednosti mjernog signala pri rastućoj i padajućoj sili.....	50
Tablica 10.	Razlike srednjih vrijednosti signala u odnosu na centar za rastuće nizove sa i bez rotacije .....	56
Tablica 11	Razlike srednjih vrijednosti signala u odnosu na referentne vrijednosti za rastuće nizove sa i bez rotacije.....	60
Tablica 12.	Razlike srednjih vrijednosti signala u odnosu na centar za padajuće nizove .....	62
Tablica 13.	Razlike srednjih vrijednosti signala u odnosu na referentne vrijednosti za padajuće nizove .....	66
Tablica 14.	Koeficijenti interpolacijskih jednadžbi.....	69
Tablica 15.	Vrijednosti relativne pogreške nule .....	69
Tablica 16.	Pogreške posredničkog etalona, klasa i mjerna nesigurnost.....	70
Tablica 17.	Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u položaju A .....	77
Tablica 18.	Rezultati umjeravanja za dinamometar u položaju A.....	77
Tablica 19.	Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u položaju B.....	78
Tablica 20.	Rezultati umjeravanja za dinamometar u položaju B.....	78
Tablica 21.	Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u položaju C.....	79
Tablica 22.	Rezultati umjeravanja za dinamometar u položaju C.....	79
Tablica 23.	Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u položaju D .....	80
Tablica 24.	Rezultati umjeravanja za dinamometar u položaju.....	80



## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje
$a$	-	poluširina
$\vec{a}$	$\text{m/s}^2$	akceleracija
$A$	V/V	pojačanje
$A_s$	-	pojačanje snage pojačala
$A_0$	-	pojačanje
$b$	%	relativna pogreška obnovljivosti u nizovima sa rotacijom
$b'$	%	relativna pogreška ponovljivosti u nizovima bez rotacije
$D_t$	-	očitanje na pokazivaču dinamometra pri temperaturi $\vartheta$
$D_e$	-	očitanje na pokazivaču dinamometra pri temperaturi umjeravanja $\vartheta_e$
$d$	m	promjer
$d_0$	m	početni promjer
$\Delta d$	m	promjena promjera
$E$	$\text{N/mm}^2$	Youngov modul elastičnosti
$F_f$	N	nazivna sila dinamometra
$F_N$	N	najveća umjeravana sila
$F_{\min}$	N	najmanja vrijednost umjeravane sile
$F$	N	sila
$f$	Hz	frekvencija
$f_c$	%	relativno interpolacijsko odstupanje
$f_d$	Hz	gornja granična frekvencija
$f_g$	Hz	donja granična frekvencija
$f_0$	%	relativno odstupanje nul vrijednosti
$f_2$	Hz	gornja granična frekvencija
$f_1$	Hz	donja granična frekvencija
$\Delta f$	Hz	frekvencijski pojas
$G$	$\text{N/mm}^2$	modul smika
$h$	m	visina štapa
$I_{ul}$	A	ulazna struja
$I_{iz}$	A	izlazna struja
$i_f$	mV/V	očitanje na pokazivaču dinamometra nakon rasterećenja
$i_0$	mV/V	očitanje na pokazivaču dinamometra prije primjene sile

$k_B$	J/K	Boltzmannova konstanta
$K$	-	konstanta
$k$	-	faktor pokrivanja
$\Delta l$	mm	produljenje
$l$	mm	mjerna duljina
$l_0$	mm	početna mjerna duljina
$m$	kg	masa tijela
$M_t$	Nm	moment uvijanja štapa
$M_s$	Nm	moment savijanja štapa
$n$	-	broj ponovljenih mjerenja
$N_{ul}$	-	jačina šuma na ulazu
$N_{iz}$	-	jačina šuma na izlazu
$P_t$	W	snaga
$r$	N	rezolucija pokazivača
$R_e$	N/mm <sup>2</sup>	granica razvlačenja
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	vlačna čvrstoća
$R_o$	$\Omega$	električni otpor nedeformirane žice
$R$	$\Omega$	električni otpor
$\Delta R$	$\Omega/\Omega$	promjena električnog otpora
$R_n$	$\Omega$	električni otpor tenzometarske mjerne trake
$S_0$	mm <sup>2</sup>	početna površina poprečnog presjeka
$S$	mm <sup>2</sup>	površina poprečnog presjeka
$\Delta S$	%	promjena površine poprečnog presjeka
$S_{ul}$	W	jačina signala na ulazu
$S_{iz}$	W	jačina signala na izlazu
$s$	-	standardna devijacija
$s_{SR}$	-	standardna devijacija aritmetičkih sredina
$T$	K	apsolutna temperatura
$\vartheta$	°C	temperatura
$\vartheta_e$	°C	temperatura umjeravanja
$U_{ul}$	V	ulazni napon
$U_{iz}$	V	izlazni napon
$U_o$	V	nameravani napon
$U_M$	V	mjerni napon

$w_B$	%	sastavljena standardna nesigurnost vrste B
$w_A$	%	sastavljena standardna nesigurnost vrste A
$W_i$	-	težinski faktor
$W$	%	proširena mjerna nesigurnost
$w_A$	%	standardna mjerna nesigurnost vrste A
$w_B$	%	standardna mjerna nesigurnost vrste B
$w_{din}$	%	sastavljena standardna nesigurnost etalona sile
$w_{CMC-LIMS}$	%	umjerna i mjerna sposobnost laboratorija
$w_{nul}$	%	nesigurnost odstupanja nule
$w_{pon}$	%	nesigurnost ponovljivosti bez rotacije
$w_{obn}$	%	nesigurnost obnovljivosti sa rotacijom
$w_{int}$	%	nesigurnost interpolacijskog odstupanja
$w_{rez}$	%	nesigurnost rezolucije uređaja za očitavanje
$w_{hist}$	%	nesigurnost histereze
$W_y$	m <sup>3</sup>	aksijalni moment otpora
$W_p$	m <sup>3</sup>	polarni moment otpora
$X$	mV/V	izmjerena vrijednost pri rastućoj ispitnoj sili
$X_a$	mV/V	interpolirana vrijednost
$X'$	mV/V	izmjerena vrijednost pri padajućoj ispitnoj sili
$X_{max}$	mV/V	maksimalna vrijednost izmjerena u nizovima 1, 3 i 5
$X_{min}$	mV/V	minimalna vrijednost izmjerena u nizovima 1, 3 i 5
$X_N$	mV/V	izmjerena vrijednost koja odgovara najvećoj umjeravanoj sili
$\bar{X}_r$	mV/V	srednja vrijednost očitavanja u nizovima sa rotacijom
$\bar{X}_{wr}$	mV/V	srednja vrijednost očitavanja u nizovima bez rotacije
$X_{SR}$	mV/V	aritmetička srednja vrijednost
$X_{SR1-2}$	mV/V	srednja vrijednost očitavanja u nizovima 1 i 2
$X_{SR1-3-5}$	mV/V	srednja vrijednost očitavanja u nizovima 1, 3 i 5
$X_{SR4'-6'}$	mV/V	srednja vrijednost očitavanja u nizovima 4 i 6
$Z$	-	faktor šuma
$z$	mm	širina štapa
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	naprezanje
$\sigma_{max}$	N/mm <sup>2</sup>	najveće normalno naprezanje
$\varepsilon_s$	mm/mm	svojna deformacija
$\varepsilon_t$	mm/mm	uvojna deformacija

$\varepsilon_q$	%	poprečna deformacija
$\varepsilon$	%	deformacija (relativno produljenje)
$\rho$	$\Omega\text{m}$	specifični otpor
$\tau_{max}$	$\text{N/mm}^2$	najveće smično naprezanje
$\nu$	%	relativna pogreška histereze
$\nu_p$	-	Poissonov faktor

## IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj Diplomski rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu, te znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu uz stručnu pomoć Doc.dr.sc. Danka Ćorića .

Krešimir Meštrović

## 1. UVOD

Sila je vektorska fizikalna veličina kojom opisujemo međudjelovanje tijela i njegove okoline, koja uzrokuje promjenu gibanja, oblika i/ili energije tijela. Oznaka za silu je  $F$  i izražava se njutnima – N (jedinica nazvana prema Isaacu Newtonu). Učinak sile na neko tijelo ovisi i o točki u kojoj sila djeluje (hvatište sile). Ako se djelovanje sile ne može (približno) reducirati na jednu točku, često je potrebno silu rastaviti na komponente koje djeluju na dovoljno male („točkaste“) volumene (ovisno o vrsti sile i učinku koji se promatra).

Vrlo je važno poznavanje sile te ispravno i kvalitetno njeno mjerenje s obzirom da je to jedna od osnovnih fizikalnih veličina na temelju koje se određuju mehanička svojstva nekog materijala ili proizvoda [1].

Polazište za razumijevanje djelovanja sila čine Newtonovi zakoni gibanja.

**Newtonovi zakoni gibanja** su tri zakona klasične mehanike objavljena 1687. Godine u djelu *“Philosophiae naturalis principia mathematica“* Isaaca Newtona.

Zakovitosti klasične mehanike Newton je izrekao u slijedeća tri zakona:

1. Tijelo koje miruje ustraje u mirovanju, a tijelo koje se giba jednoliko po pravcu ustraje u tome gibanju, sve dok to ne promijene neke vanjske sile (sila trenja, i sl.).
2. Sila koja djeluje na tijelo jednaka je umnošku mase tog tijela ( $m$ ) i akceleracije ( $a$ ) koje je tijelo dobilo njezinim djelovanjem:

$$\vec{F} = m \vec{a}, \text{ (N)} \quad (1.1)$$

Ako jedno tijelo djeluje na drugo tijelo nekom silom, tada istovremeno drugo tijelo djeluje na prvo silom jednake vrijednosti, ali suprotnog smjera:

$$\mathbf{F}_{2,1} = -\mathbf{F}_{1,2} \text{ [2]}. \quad (1.2)$$

Osnovna podjela sila:

- kontaktne – kako im i samo ime govori, rezultat su fizičkog dodira dvaju tijela. Djelovanje neke kontaktne sile se prenosi mijenjanjem međuatomskih (međumolekulskih) razmaka u strukturi tvari. Postoji više vrsta kontaktnih sila;

- aktivne – npr. Sila kojom reket udara tenisku lopticu;
- reaktivne – npr. Sila kojom podloga djeluje na tijela položena na podlogu;
- vanjske – sve kontaktne sile koje na neki sustav djeluju izvana;
- unutarnje – sile međudjelovanja elemenata unutar nekog sustava – npr. Naprezanje u materijalu;
- volumenske (masene) – vezane su uz postojanje polja sila u nekom prostoru. One ne djeluju neposredno na neki dio tijela, a na ostale dijelove posredno, već istovremeno djeluju na sve čestice tijela, tj. prožimaju ga u njegovom cijelom volumenu. Ovoj vrsti sila pripadaju elektromagnetske, gravitacijska i inercijalne sile. Elektromagnetska i gravitacijska sila su uvijek aktivne sile, dok su inercijalne sile svojevrsna analogija reakcijskih sila s obzirom da su reakcija na promjenu stanja gibanja [3].

Dosadašnja istraživanja pokazuju da sve sile koje na Zemlji opažamo možemo svesti na samo nekoliko fundamentalnih sila, a to su:

- 1) gravitacijska sila,
- 2) elektromagnetska sila,
- 3) slaba nuklearna sila,
- 4) jaka nuklearna sila.

Prve dvije sile su odavno poznate i lako se opažaju i na velikim udaljenostima. Druge dvije sile opažaju se samo na malim udaljenostima, otprilike u razmjerima atomske jezgre, a otkrivene su tek u prošlom stoljeću. Jaka nuklearna sila snažno djeluje među kvarkovima – česticama od kakvih su građeni protoni i neutroni – pa dakle i među protonima i neutronima. Slaba djeluje među kvarkovima i leptonima (od kojih je opće poznat samo elektron) pa se opaža npr. kod beta radioaktivnog raspada [3].

## 2. POGREŠKE MJERNOG SUSTAVA

Odstupanja kod mjerenja općenito se javljaju zbog nesavršenosti:

- mjerne opreme,
- mjernog postupka,
- mjernog objekta,
- vanjskih utjecaja,
- mjeritelja [4].

Jedan od osnovnih čimbenika koji presudno utječe na kvalitetu mjerenja svako je stanje mjerne opreme ili nekog mjernog sustava. Pri procjeni i analizi stanja mjernog sustava treba voditi računa o osnovnim karakteristikama koje determiniraju svaki mjerni sustav, a to su :

**ponovljivost** – usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerne veličine izvedenih uz primjenu istih mjeriteljskih uvjeta koji obuhvaćaju:

- isti mjerni postupak,
- isti mjeritelj,
- isto mjerilo upotrijebljeno pod istim uvjetima,
- isto mjerno mjesto,
- ponavljanje u kratkom razdoblju.

**Obnovljivost** – rasipanje između mjernih rezultata iste mjerne veličine dobiveno uz promjenu nekog mjernog uvjeta kao što je primjerice: mjerna metoda, mjeritelj, ispitno mjerilo, mjesto ispitivanja, okolišni uvjeti, vrijeme i sl. [5].

**Netočnost** – razlika između dobivenog rezultata mjerenja i referentne vrijednosti. Referentna vrijednost je vrijednost koja služi kao dogovorena referenca za mjerenu vrijednost. Može biti utvrđena na osnovi srednje vrijednosti rezultata više mjerenja provedenih nekom točnijom mjernom opremom.

**Linearna pogreška** – stalan (linearni) rast ili pad vrijednosti pogreške rezultata mjerenja (netočnosti) unutar određenog dijela mjernog područja instrumenta.

**Nestabilnost** – ukupna varijacija mjerenja jedne karakteristike tijekom dužeg vremenskog razdoblja.

Stoga potpuna mjeriteljska informacija pri iskazivanju mjernog rezultata uključuje i podatak o mjernoj nesigurnosti kojom se uzima u obzir djelovanje navedenih karakteristika.



### **3. MJERNA NESIGURNOST**

#### **3.1. Općenito**

Niti jedno mjerenje ne može biti savršeno bilo zbog promjene okolišnih uvjeta (temperatura, tlak, vlaga), ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja uzrokovanih promjenom karakteristika instrumenta između dva umjeravanja, jednako kao i zbog utjecaja mjeritelja pri očitavanju analogne skale te brojnih drugih čimbenika koji utječu na samo mjerenje. Stoga rezultat mjerenja ne može biti potpuno točan već on sadrži veću ili manju pogrešku što upućuje na potrebu iskazivanja mjerne nesigurnosti. Jedan od primarnih problema u mjeriteljstvu je kako procijeniti mjernu nesigurnost rezultata mjerenja.

Mjerna nesigurnost definira se kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno moglo pripisati mjerenoj veličini. Mjerna nesigurnost zapravo opisuje povjerenje u rezultat mjerenja. Da bi povjerenje u rezultat bilo veliko nesigurnost mora biti što manja. Veličina iskazane mjerne nesigurnosti ovisi o uvjetima koji vladaju tijekom mjerenja, stanju mjerne opreme, vremenskim intervalima i drugim bitnim čimbenicima.

Mjernu nesigurnost moguće je opisati kako slijedi:

- mjerna nesigurnost je mjera moguće pogreške procijenjene vrijednosti mjerne veličine koja se navodi uz rezultat mjerenja;
- mjerna nesigurnost je brojčani iskaz kvalitete mjernog rezultata;
- procjena koja karakterizira raspon vrijednosti unutar kojeg leži prava (stvarna) vrijednost mjerene veličine;
- mjerna nesigurnost označava sumnju u valjanost mjernog rezultata [6].

##### **3.1.1. Procjena standardne mjerne nesigurnosti**

Veličina mjerne nesigurnosti u osnovi se može odrediti pokusima tako da se svaka od veličina koje utječu na mjereni rezultat varira i da se potom statističkim metodama procjenjuje nesigurnost. Takav postupak zahtjeva vrijeme i novac te nije uobičajen. Najčešće se pretpostavlja matematički model ovisnosti mjerene veličine o utjecajnim faktorima i odgovarajuća vjerodostojna razdioba.

Mnogi su izvori mjerne nesigurnosti, no prema preporukama sastavnice mjerne nesigurnosti mogu se svrstati u dvije osnovne skupine A i B i to prema načinu procjene nesigurnosti, a ne prema svojstvima samih sastavnica.

**Skupina A (tip A):** sastavnice nesigurnosti kojih se vrijednost procjenjuje na osnovi niza ponovljenih mjerenja statističkim postupcima. Nesigurnosti tipa A temelje se na procjeni standardnog odstupanja i na broju stupnjeva slobode. Standardna devijacija  $\sigma$  predstavlja pozitivnu vrijednost drugog korijena varijancije  $s^2$ .

**Skupina B (tip B):** sastavnice nesigurnosti kojih se vrijednost procjenjuje iskustveno ili na temelju podataka proizvođača, iz različitih priručnika i sl. Sastavnica nesigurnosti tipa B je veličina za koju se smatra da odgovara standardnoj devijaciji.

Svrha razvrstavanja nesigurnosti na tip A i tip B je da se pokažu dva različita načina procjene mjerne nesigurnosti s time da ne postoji nikakva razlika u naravi sastavnica tih dviju skupina. Obje vrste procjene i proračuna mjerne nesigurnosti temelje se na razdiobama vjerojatnosti, a sastavnice nesigurnosti koje proizlaze iz ovih proračuna kvantitativno se iskazuju varijancama ili standardnim odstupanjima.

Mogući izvori mjerne nesigurnosti mogu se sažeti kako slijedi:

- nepotpuna realizacija mjerene veličine,
- nesavršeno ostvarenje određenja mjerne veličine,
- nedovoljno poznavanje utjecaja okolišnih uvjeta na samo mjerenje ili nesavršeno mjerenje uvjeta okoliša,
- nedovoljna razlučivost instrumenta ili nedovoljan prag pokretljivosti,
- netočne vrijednosti mjernih etalona,
- netočne vrijednosti konstanti i drugih parametara dobivenih iz vanjskih izvora i korištenih u proračunu,
- približna određenja i pretpostavke uključene u mjernu metodu i postupak,
- promjene ponovljenih opažanja mjerene veličine u očigledno istovjetnim uvjetima [7].

#### *Procjena nesigurnosti tipa A*

Procjena nesigurnosti tipa A temelji se na statističkoj analizi rezultata nekoliko serija mjerenja. Na osnovu rezultata ponovljenih mjerenja izračunava se aritmetička sredina i standardna devijacija.

Aritmetička sredina niza očitavanja od  $X_1$  do  $X_n$  najvjerojatnija je vrijednost mjerene veličine, te se smatra najboljom aproksimacijom mjerene veličine.

Kako je ponovljenim mjerenjima mjerna nesigurnost svakog pojedinačnog mjernog rezultata jednaka, aritmetička srednja vrijednost izračunava se izrazom:

$$X_{SR} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (3.1)$$

Standardna devijacija ( $s$ ) pojedinačnih vrijednosti rezultata mjerenja je mjera rasipanja ili nepreciznosti pojedinačnih očitavanja. U slučaju ponovljenih mjerenja ona se izračunava izrazom:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{SR})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

gdje je :

$n$  – broj ponovljenih mjerenja,

$X_i$  – rezultat  $i$ -tog mjerenja,

$X_{SR}$  – aritmetička srednja vrijednost izmjerenih rezultata.

Standardna devijacija aritmetičkih sredina ( $s_{SR}$ ) od  $n$  ponovljenih mjerenja manja je od standardne devijacije ponovljenih mjerenja ( $s$ ) :

$$s_{SR} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

Iz toga slijedi da se ponavljanjem mjerenja i izračunom srednje vrijednosti može mjerna nesigurnost rezultata, uzrokovana slučajnim odstupanjima, smanjiti za faktor  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ .

Obnavljanim mjerenjima mjerna nesigurnost svakog pojedinačnog mjernog rezultata iz niza mjerenja općenito nije jednaka, pa se aritmetička srednja vrijednost računa pomoću izraza:

$$X_{SR} = \frac{X_1 W_1 + X_2 W_2 + \dots + X_m W_m}{W_1 + W_2 + \dots + W_m} \quad (3.4)$$

gdje su rezultati mjerenja  $X_1, X_2, \dots, X_m$  pomnoženi s pripadajućim težinskim faktorima  $W_i$  koji ovise o nesigurnosti dotičnog mjernog rezultata.

Težinski faktor svakog mjernog rezultata određuje se iz jednadžbe:

$$W_i = \frac{K}{s_i^2} \quad (3.5)$$

Težina svakog mjernog rezultata obrnuto je proporcionalna kvadratu njegove nesigurnosti iskazane standardnom devijacijom. Konstanta K odabire se po volji, no najbolje je da je jednaka kvadratu najveće nesigurnosti, jer su tada svi ostali težinski faktori veći od 1. Standardna devijacija opće srednje vrijednosti je manja od standardne devijacije pojedinačnih mjerenja, a izračunava se slijedećom jednadžbom:

$$s_{SR} = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{s_i^2}}} \quad (3.6)$$

Normalna ili Gaussova razdioba je najvažnija i najčešća razdioba u primjeni matematičke statistike. To je zvononasta simetrična, jednotjemena funkcija kontinuirane slučajne varijable  $x$ , jednoznačno određena dvama parametrima (aritmetičkom sredinom osnovnog skupa i standardnim odstupanjem  $\sigma$ ) [8].

#### *Procjena nesigurnosti tipa B*

Procjena mjerne nesigurnosti vrste B procjena je ekvivalentne standardne devijacije na osnovu pretpostavljene razdiobe učestalosti i ovisi o:

- specifikacijama mjerne opreme,
- podacima umjeravanja,
- podacima o nesigurnosti korištenih konstanti,
- podacima o ponovljivosti i obnovljivosti mjernog procesa,
- podacima o ranije provedenim sličnim mjerenjima,
- iskustvu i znanju o svojstvima relevantnih mjerila i uzoraka.

Kada se za svaki čimbenik nesigurnosti vrste B izračunaju pripadajuće mjerne nesigurnosti, sastavljena mjerna nesigurnost računa se pomoću izraza:

$$w_B = \sqrt{w(x_1) + w(x_2) + \dots + w(x_n)} \quad (3.7)$$

gdje su:

$w_B$  - sastavljena standardna mjerna nesigurnost vrste B

$w(x_n)$ - standardne mjerne nesigurnosti uzrokovane utjecajem parametara vrste B [8].

### *Procjena nesigurnosti iz graničnih pogrešaka*

Ukoliko je o nekom instrumentu poznata samo maksimalna pogreška navedena u specifikaciji kao  $\pm a$  (granična pogreška) i ukoliko nema nikakvih podataka o distribuciji mjerene vrijednosti unutar graničnih vrijednosti, pretpostavlja se jednaka vjerojatnost pojavljivanja izmjerene veličine unutar intervala  $\pm a$ . Takva razdioba naziva se pravokutnom i predstavlja najnepovoljniju razdiobu mjernog rezultata unutar danih granica.

## 4. SLJEDIVOST MJERENJA I ZNAČAJ UMJERAVANJA

### 4.1. Sljedivost mjerenja

Sljedivost mjerenja je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti kojeg etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referentnim etalonom (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedbi koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti [7].

Navedena referenca može biti:

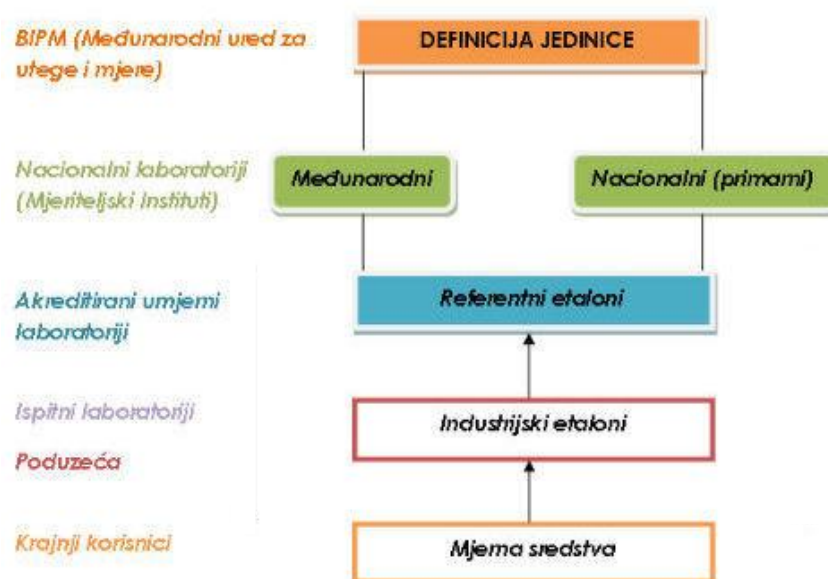
- a) brojčana referentna vrijednost koja je dodijeljena dogovorenom certificiranom referentnom materijalu (tzv. «brojčani standard»),
- b) vrijednost jedinice SI sustava,
- c) vrijednost dobivena mjerenjem pomoću dogovorene međunarodne referentne metode.

Koncepcija sljedivosti općenito ima jedno od tri osnovna značenja:

- u odnosu na proizvod: sljedivost se odnosi na porijeklo materijala ili dijelova, na slijed tehnoloških postupaka obrade proizvoda ili na raspodjelu i smještaj proizvoda nakon isporuke;
- kod umjeravanja: sljedivost povezuje mjerne uređaje s nacionalnim ili međunarodnim etalonima, primarnim etalonima ili referentnim materijalom;
- u odnosu na sadržane podatke: sljedivost povezuje različite izračune i podatke koji iz njih slijede sa zahtjevima definiranim sustavom kakvoće.

Sljedivost ispitivanja i mjerenja ne obuhvaća samo tehničke mjere poput umjeravanja, već i organizacijske u provedbi samog ispitivanja ili umjeravanja. S tog stajališta moraju se moći identificirati sve osobe koje su planirale i izvodile mjerenja ili su na neki drugi način involvirane u njima.

Lanac sljedivosti na slici 1 je neprekidan lanac usporedbi koje se moraju provesti kako bi se osiguralo da mjerni rezultat ili vrijednost nekog etalona bude sljediv do etalona više mjeriteljske razine, što u konačnici najčešće završava primarnim etalonom. Krajnji korisnik može postići sljedivost do najviše međunarodne razine izravno preko nacionalnog mjeriteljskog instituta ili sekundarnog umjernog laboratorija. Kao rezultat različitih sporazuma o međusobnome priznavanju, sljedivost se može osigurati umjeravanjima kako u domaćim tako i stranim ustanovama i institutima [9].



Slika 1. Lanac mjerne sljedivosti [10]

Jedan od bitnih parametara koji određuju sljedivost rezultata mjerenja je i mjerna nesigurnost [11]. Nesigurnost raste od vrha prema dnu lanca mjerne sljedivosti. Najveće nesigurnosti javljaju se kod krajnjih korisnika koji rabe mjerna sredstva i ispitne uređaje za različita tvornička mjerenja, a najmanja nesigurnost susreće se kod primarnih i definicijskih etalona.

#### 4.1.1. Osiguranje sljedivosti mjerenja

Osiguranje sljedivosti postiže se prvenstveno umjeravanjem i/ili ispitivanjem mjerne i ispitne opreme u laboratorijima koji mogu dokazati svoju sljedivost i stručnu osposobljenost. Takvi laboratoriji moraju imati razvijen sustav umjeravanja za svu opremu koju koriste u svakodnevnim aktivnostima. Za opremu koja podliježe umjeravanju, laboratorij mora uspostaviti i provoditi program umjeravanja i/ili ispitivanja kako bi se osigurala sljedivost mjerenja sve do državnog, međunarodnog ili definicijskog etalona [12]. Time se stvaraju pretpostavke za međusobnu usporedivost rezultata mjerenja različitih laboratorija. Zato za svako pojedino ispitivanje ili analizu (kada je to moguće) protokol osiguranja kvalitete, sukladno normi HRN EN ISO/IEC 17025:2000, zahtijeva sljedivost do “navedene referentne vrijednosti” i izražavanje rezultata u mjernim jedinicama SI sustava (“International System of Units”).

Sljedivost mjerenja koja se provode u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) Fakulteta strojarstva i brodogradnje ostvaruje se preko referentnog etalona sile (slika 2). Instalacijom ovog etalona LIMS-a je proširio područje akreditacije koje je do tada bilo ograničeno

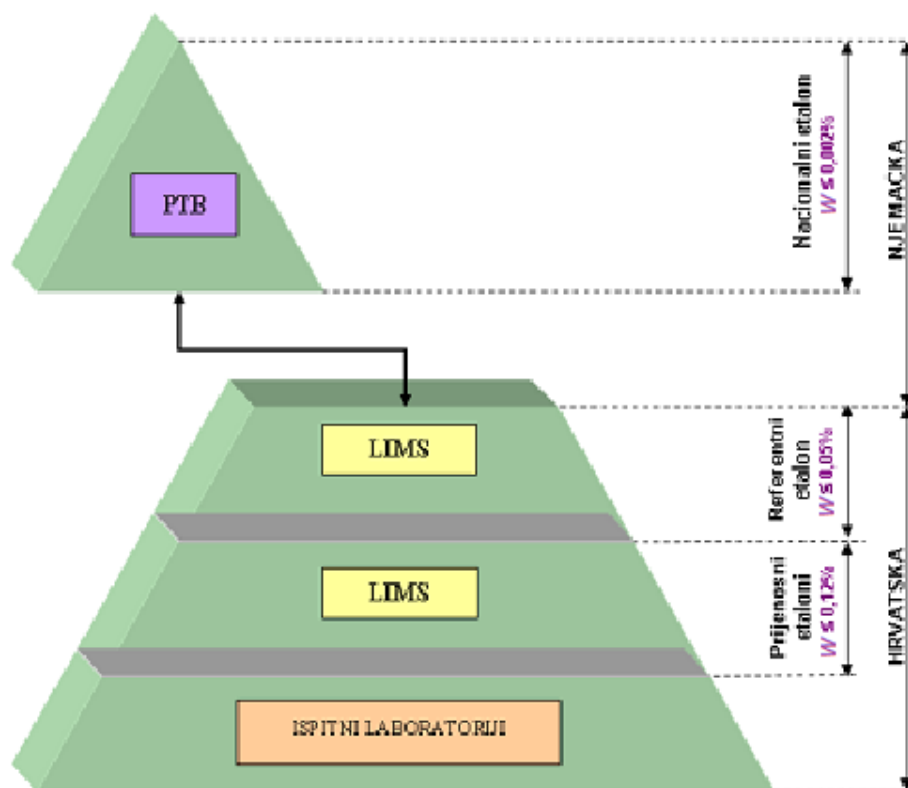
na umjeravanje mjerila sile nazivne vrijednosti do 200 kN i na umjeravanje prijenosnih etalona sile koji se koriste pri ispitivanju kidalica. Osim toga uspostavom referentnog etalona poboljšana je umjerna i mjerna sposobnost laboratorija na vrijednost od samo 0,05 %, a do tada je ista iznosila 0,12 %. Time su stvorene pretpostavke za umjeravanje prijenosnih etalona sile klase 1 kojima LIMS raspolaže čime su značajno smanjeni troškovi jer su se ova umjeravanja u pravilu provodila u stranim mjeriteljskim institutima, prvenstveno PTB-u (Physikalisch Technische Bundesanstalt) u Njemačkoj. Pomoću referentnog etalona sile osigurava se sljedivost državnih etalona za silu kako je to regulirano ugovorom s Državnim zavodom za mjeriteljstvo. Radi se o nizu etalona u vlasništvu LIMS-a područja sile od 50 N do 200 kN. Osim toga instalacijom ovoga etalona omogućeno je sudjelovanje u interkomparacijama s drugim nacionalnim laboratorijima, a samim time i potvrđivanje mjerne sposobnosti što je jedan od zahtijeva norme HRN EN ISO/IEC 17025 za ispitne i umjerne laboratorije [13].



Slika 2. Referentni etalon sile [13]

Slika 3 prikazuje piramidu sljedivosti mjerila i etalona sile u Republici Hrvatskoj.



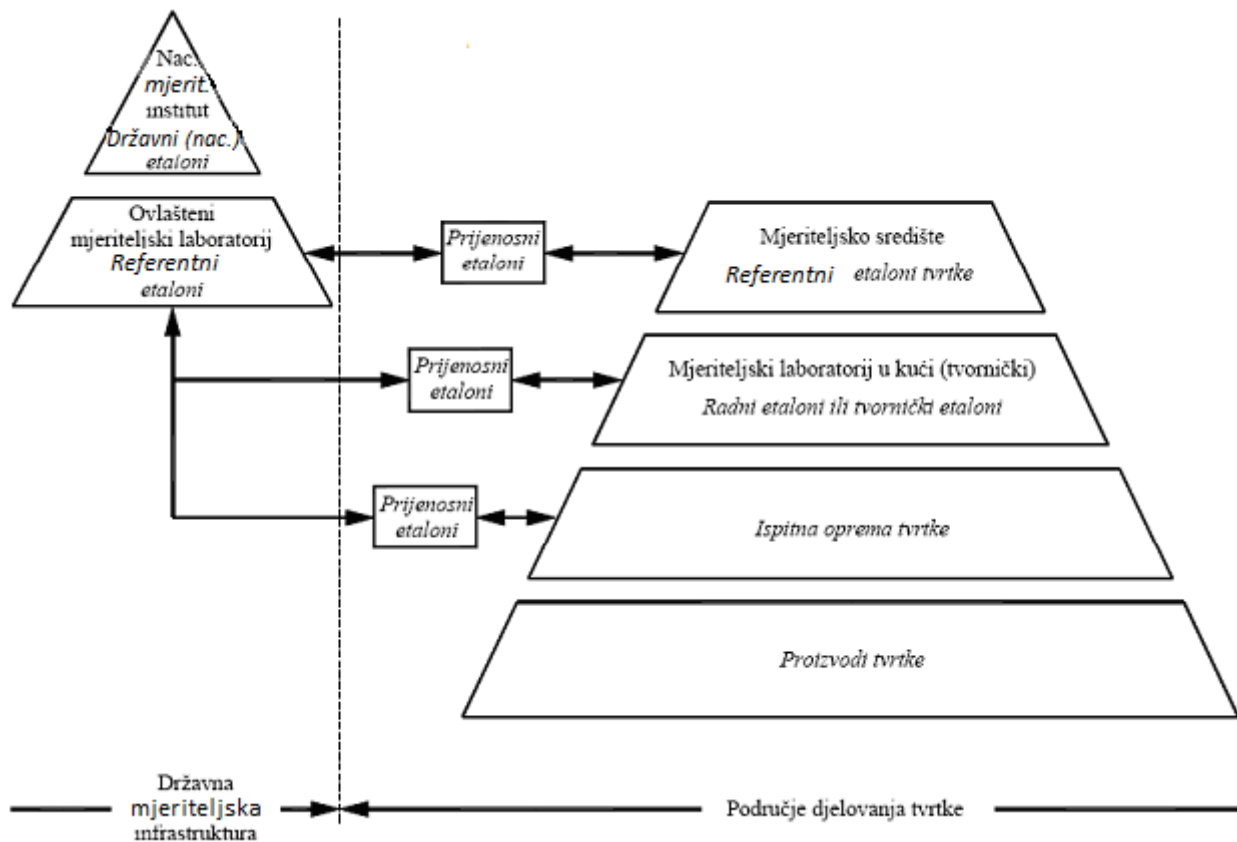


Slika 3. Piramida sljedivosti mjerila sile [14]

## 4.2. Umjeravanje

Umjeravanje predstavlja skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referentna tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima [15].

Osnovna svrha umjeravanja je osiguranje mjerne sljedivosti kako bi se postigla ujednačenost mjerenja u tvrtki proizvođača i kod kupca koji taj proizvod koristi ili ugrađuje. Mora postojati jamstvo da proizvođač i kupac mjere “istom mjerom”, a to se postiže kroz umjeravanja. Na slici 4 je prikazana hijerarhija umjeravanja na kojoj su uočljive međusobne veze između područja djelovanja neke tvrtke (desna strana slike) i državne mjeriteljske infrastrukture (lijeva strana slike) [12].



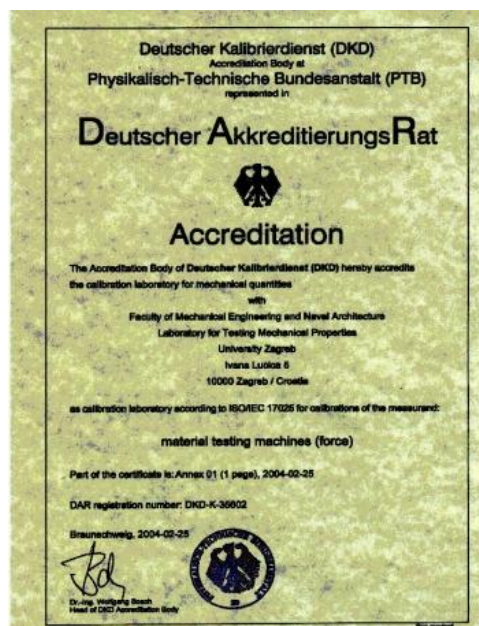
Slika 4. Hijerarhija umjeravanja [12]

Umjeravanje općenito obuhvaća određivanje mjeriteljskih značajki nekog mjerila ili referentne tvari. Ono se provodi izravnom usporedbom ispitivanog mjerila s etalomom veće mjerne preciznosti koji se nalazi na višoj razini piramide umjeravanja. Kao dokaz o provedenom umjeravanju izdaje se potvrda ili certifikat umjeravanja, a vrlo često i naljepnica koja se stavlja na ispitivano mjerilo.

Četiri su osnovna razloga zbog kojih se mjerila umjeravaju:

- 1) uspostavljanje i osiguravanje sljedivosti mjerenja;
- 2) stvaranje pretpostavki da očitavanja mjerila budu sukladna drugim uređajima;
- 3) određivanje točnosti očitavanja;
- 4) utvrđivanje pouzdanosti mjerila, tj može li mu se vjerovati [16].

Za provedbu umjeravanja zaduženi su akreditirani mjeriteljski laboratoriji koji su osposobljeni i ovlašteni za umjeravanje i ispitivanje mjerila i etalona određene fizikalne veličine [17]. Tako je Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstva u Zavodu za materijale ovlašten za umjeravanje kidalica i preša u mjernom području 50 N do 200 kN. Od veljače 2004. Godine LIMS djeluje kao akreditirani laboratorij pod oznakom DKD-K-35602, slika 5.



Slika 5. Akreditacija LIMS-a [13]

Kako je već i spomenuto danas je područje njegove akreditacije prošireno i na umjeravanje prijenosnih etalona sile koji se koriste pri ispitivanju jednoosnih kidalica.

#### 4.2.1. Hijerarhija umjeravanja

Umjeravanje nekog mjerila provodi se pomoću etalona čije su mjeriteljske značajke određene umjeravanjem etalomom boljih mjeriteljskih karakteristika te se time uspostavlja svojevrsna hijerarhija umjeravanja kako je opisano u tekstu koji slijedi.

##### *Međunarodna razina*

Na međunarodnoj razini odluke koje se odnose na Međunarodni sustav jedinica (SI) i ostvarenje primarnih etalona donosi Opća konferencija za utege i mjere ("Conférence Générale des Poids et Mesures", CGPM). Međunarodni ured za utege i mjere (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) zadužen je za usklađivanje razvoja i čuvanje primarnih etalona te za njihovo međusobno uspoređivanje na najvišoj razini.

##### *Nacionalni mjeriteljski instituti*

Nacionalni mjeriteljski instituti najviši su autoriteti mjeriteljstva u nekoj državi. U većini slučajeva oni raspolažu nacionalnim etalonima koji su izvor sljedivosti za odgovarajuću fizikalnu veličinu u toj zemlji. Ako nacionalni mjeriteljski institut ima sredstva za ostvarenje odgovarajuće mjerne

jedinice SI sustava (uključivo i izvedene jedinice), nacionalni etalon mora biti izravno sljediv prema primarnom etalonu. U slučaju da to nije moguće, sljedivost mjerenja osigurava se direktno preko nacionalnog etalona neke druge zemlje. Nacionalni mjeriteljski instituti osiguravaju međunarodnu usporedivost primarnih, sekundarnih i nacionalnih etalona. Odgovorni su za prenošenje mjernih jedinica prema korisnicima, bili oni znanstvenici, javne vlasti, laboratoriji ili proizvodne tvrtke. Oni su na taj način najviša razina hijerarhije umjeravanja u svakoj državi.

#### *Akreditirani umjerni laboratoriji*

Akreditirani laboratoriji često su na najvišoj razini unutrašnje hijerarhije umjeravanja kakve tvrtke. Njihov je zadatak da u određenim vremenskim intervalima uspoređuju vlastite radne etalone (tvorničke etalone) s referentnim etalonima koje je umjerio nacionalni mjeriteljski institut ili koji drugi akreditirani laboratorij koji posjeduje odgovarajuću mjernu sposobnost.

#### *Kućno umjeravanje (tvorničko umjeravanje)*

Kućni sustav umjeravanja osigurava redovito umjeravanje sve mjerne i ispitne opreme koja se upotrebljava u nekoj tvrtki. Etaloni s pomoću kojih se provodi umjeravanje moraju imati mjernu sljedivost koja se ostvaruje preko akreditiranog laboratorija ili nacionalnog mjeriteljskog instituta. Kućno umjeravanje može se dokazati tvorničkom potvrdom o umjeravanju, naljepnicom o umjeravanju ili nekom drugom prikladnom metodom.

## 5. ETALONI SILE

Mjerni etalon se definira kao tvarna mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine da bi mogla poslužiti kao referencija [17].

Kada je riječ o etalonima sile oni se mogu sistematizirati kako slijedi:

- **primarni etalon:** etalon za koji je opće potvrđeno da ima najbolju mjernu sposobnost te čije se vrijednosti prihvaćaju bez upućivanja na druge etalone iste veličine;
- **sekundarni etalon:** etalon kojemu je vrijednost dodijeljena usporedbom s primarnim etalom dotične veličine;
- **međunarodni etalon:** etalon priznat međunarodnom konvencijom da bi služio kao međunarodna osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima;
- **državni (nacionalni) etalon:** etalon priznat odlukom neke države kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima na prostoru te države;
- **referentni etalon:** etalon koji općenito ima najbolje mjeriteljske karakteristike na danom mjestu ili nekoj tvrtci te se iz njega izvode sva mjerenja koja se tamo provode;
- **posrednički etalon:** etalon koji se rabi kao posrednik za usporedbu etalona;
- **prijenosni etalon:** etalon, ponekad specifične konstrukcije, namijenjen za prijenos neke veličine na razne lokalitete;
- **radni etalon:** etalon koji se redovito upotrebljava za umjeravanje ili provjeru ispitnih mjerila [12].

### 5.1. Referentni etalon

Referentni etaloni sile ("Force Calibration Machines" – FCM) služe za vrednovanje etalona i mjerila nižih mjernih sposobnosti, a najčešće se nalaze u akreditiranim laboratorijima. Oni predstavljaju vezu između nacionalnog etalona sile i ostalih etalona i mjerila sile, jer su umjereni s obzirom na nacionalni etalon, a prema njima se opet umjeravaju sva druga mjerila. Referentni etaloni su stabilni uređaji za mjerenje sile na kojima se ona može ostvariti na više načina. U tablici 1 navedene su četiri osnovne metode realizacije sile o kojima ponajviše ovisi mjerna sposobnost referentnih etalona [10].

Tablica 1. Vrijednosti mjerne sposobnosti referentnih etalona [11]

Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja	Procijenjena mjerna sposobnost (proširena relativna mjerna nesigurnost)
Mehanizam opterećivanja direktno utezima	$5 \times 10^{-5}$ do $1 \times 10^{-4}$
Hidraulični mehanizam opterećivanja	$1 \times 10^{-4}$ do $5 \times 10^{-4}$
Polužni mehanizam opterećivanja	$1 \times 10^{-4}$ do $5 \times 10^{-4}$
Komparatorni sustav	do $5 \times 10^{-3}$

Mjerna sposobnost uređaja s mehanizmom opterećivanja utezima može biti i bolja od  $5 \times 10^{-5}$ , ali je to često tehnički teško izvedivo ili jednostavno preskupo. Ukoliko referentni etalon postiže mjernu sposobnost od  $1 \times 10^{-4}$  to je dovoljno da bi se omogućilo umjeravanje etalona sile najviše klase 00 kako je to specificirano normom ISO 376[11].

## 5.2. Posrednički etalon

Posrednički etalon, kako je već ranije izneseno, predstavlja etalon koji se upotrebljava kao posrednik za usporedbu etalona. Danas se kao posrednički etaloni sile najviše koriste uređaji s elastičnim elementima koji rade na principu mjerenja deformacije.

Posrednički etaloni sadrže četiri osnovna dijela:

- deformacijsko tijelo (dinamometar), slika 6;
- mjerno pojačalo, slika 7;
- kabele za spajanje komponenti;
- uređaj za očitavanje.



Slika 6. Dinamometar



Slika 7. Mjerno pojačalo

Mjerno pojačalo i uređaj za očitavanje najčešće su dio jednog uređaja.

Dinamometar je mjerni instrument koji omogućuje mjerenje sile. Razlikuje se više vrsta dinamometara ovisno o njihovoj izvedbi, smjeru djelovanja opterećenja (vlak, tlak) i načinu mjerenja deformacije. Dinamometri mogu mjeriti kako vlačnu tako i tlačnu silu, a ostvarene deformacije očituju se u obliku:

- promjene volumena;
- promjene duljine;
- električne ili magnetne promjene.

Dinamometar je u principu građen od tri osnovna dijela:

- kućište;
- elastični element;
- element s određenim električnim otporom (tenzometarske mjerne trake).

Funkcije kućišta jesu sljedeće:

- omogućuje montažu dinamometra na druge uređaje;
- osigurava pravilan prijenos sile;
- štiti unutarnje elemente od štetnih vanjskih utjecaja;
- onemogućuje ometanje mjerenja nepoželjnim silama.

Na slici 8 prikazani su razni tipovi dinamometara prema njihovoj izvedbi, veličini, obliku, prihvatu sile itd.



Slika 8. Tipovi dinamometara [18]

Kako se mjerenje sile u principu bazira na određivanju deformacije tu istu deformaciju moguće je mjeriti direktno mehanički putem ili indirektno mjerenjem drugih veličina. Stoga se razlikuju slijedeći tipovi pretvornika:

- mehanički;
- akustički;
- optički;
- električni.

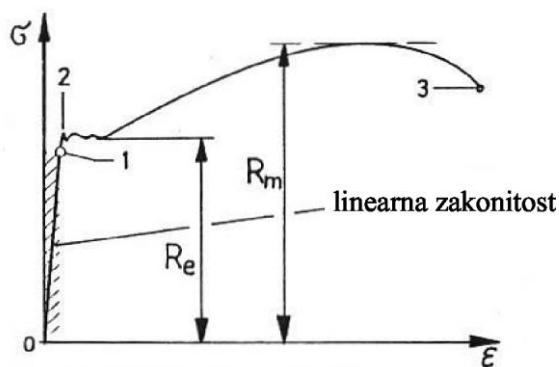
Električna mjerila deformacije rade na jednom od slijedećih principa:

- elektrootpornički;
- elektrokapacitivni;
- elektroinduktivni.

Među elektrootporničkim mjerilima deformacije najčešće su tenzometarske mjerne trake [20].

### 5.2.1. Elektrootpornički tenzometri (mjerne trake)

Elektrootporničkim mjernim trakama mjeri se deformacija temeljem koje se određuje vrijednost narinute sile. Da bi to bilo moguće ovisnost između sile i deformacije mora biti linearna. Stoga se ova mjerenja provode u linearno-elastičnom području tj. u dijelu gdje vrijedi Hookeov zakon kako je to prikazano slikom 9 koja opisuje ovisnost između naprezanja i istežanja koja kvalitativno odgovara korelaciji između sile i deformacije.



Slika 9. Dijagram naprežanje – istežanje za niskouglični čelik

Hookeov zakon za jednoosno stanje naprežanja glasi:

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (5.1)$$



gdje je:

$\sigma$  – normalno naprezanje, Mpa ili N/mm<sup>2</sup>;

$\varepsilon$  – deformacija ispitnog objekta,  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;

E – Youngov modul elastičnosti N/mm<sup>2</sup>.

Linearna  $\sigma - \varepsilon$  ovisnost proteže se do vrijednosti granice elastičnosti koja približno odgovara granici razvlačenja ( $R_e$ ). U elastično-plastičnom području pri višim vrijednostima naprezanja ovisnost više nije linearna te u ovom području nije moguće mjeriti putem tenzometarskih traka.

Osnovni princip tenzometrijskog mjerenja leži u činjenici da se deformacijom mjerne trake, koja slijedi deformaciju ispitivanog objekta mijenja električni otpor, a temeljem promjene otpora određuje se deformacija i pripadajuće opterećenje. Djelovanjem vlačnog opterećenja mjerna traka se istovremeno produljuje i sužava (slika 10) te se ovisnost između duljinske ( $\varepsilon$ ) i poprečne deformacije ( $\varepsilon_q$ ) može se iskazati izrazima:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad \varepsilon_q = -\nu_p \times \varepsilon = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (5.2)$$

gdje je:

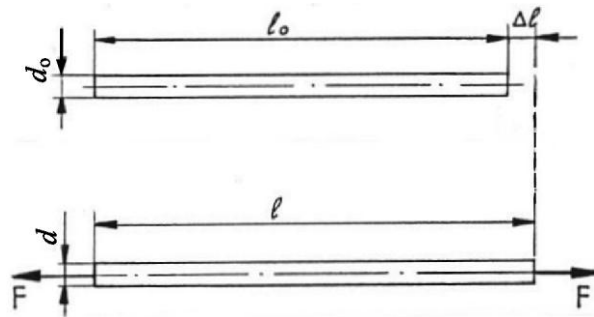
$l_0$  – početna mjerna duljina žice;

$\Delta l$  – produljenje žice u smjeru djelovanja opterećenja;

$\nu_p$  – Poissonov faktor (za izotropne materijale:  $0 \leq \nu \leq 0,5$ );

$d_0$  – početni promjer žice;

$\Delta d$  – deformacija žice okomito na smjer djelovanja opterećenja.



Slika 10. Deformacija žice pod djelovanjem opterećenja

Električni otpor žice u nederfomiranom stanju ( $R_0$ ) iznosi:

$$R_0 = \rho \cdot \frac{l_0}{S_0}, [\Omega] \quad (5.3)$$

gdje je:

$\rho$  - specifični otpor žice,  $\Omega\text{m}$ , a

$S_0$  - početna površina poprečnog presjeka žice određena izrazom:

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}, \text{ mm}^2. \quad (5.4)$$

Promjenom duljine žice mijenja se i njen električni otpor prema izrazu:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot l \cdot \frac{4}{\pi \cdot d^2}, [\Omega] \quad (5.5)$$

gdje je:

$R$  – električni otpor deformirane žice,  $\Omega$ ;

$l$  – duljina deformirane žice, mm;

$S$  – površina poprečnog presjeka deformirane žice,  $\text{mm}^2$ ;

$d$  – promjer deformirane žice, mm.

Ako se žica produlji za iznos  $\Delta l$ , istovremeno će se njen poprečni presjek smanjiti za  $\Delta S$ , odnosno električni otpor promijeniti za iznos  $\Delta R$ . Relativna promjena električnog otpora može se iskazati jednadžbom:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (5.6)$$

ili kao umnožak konstante  $k$  i deformacije  $\varepsilon$ :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (5.7)$$

Stoga se deformacija trake  $\varepsilon$  koja je identična deformaciji ispitivanog objekta na tom mjestu određuje iz izraza:

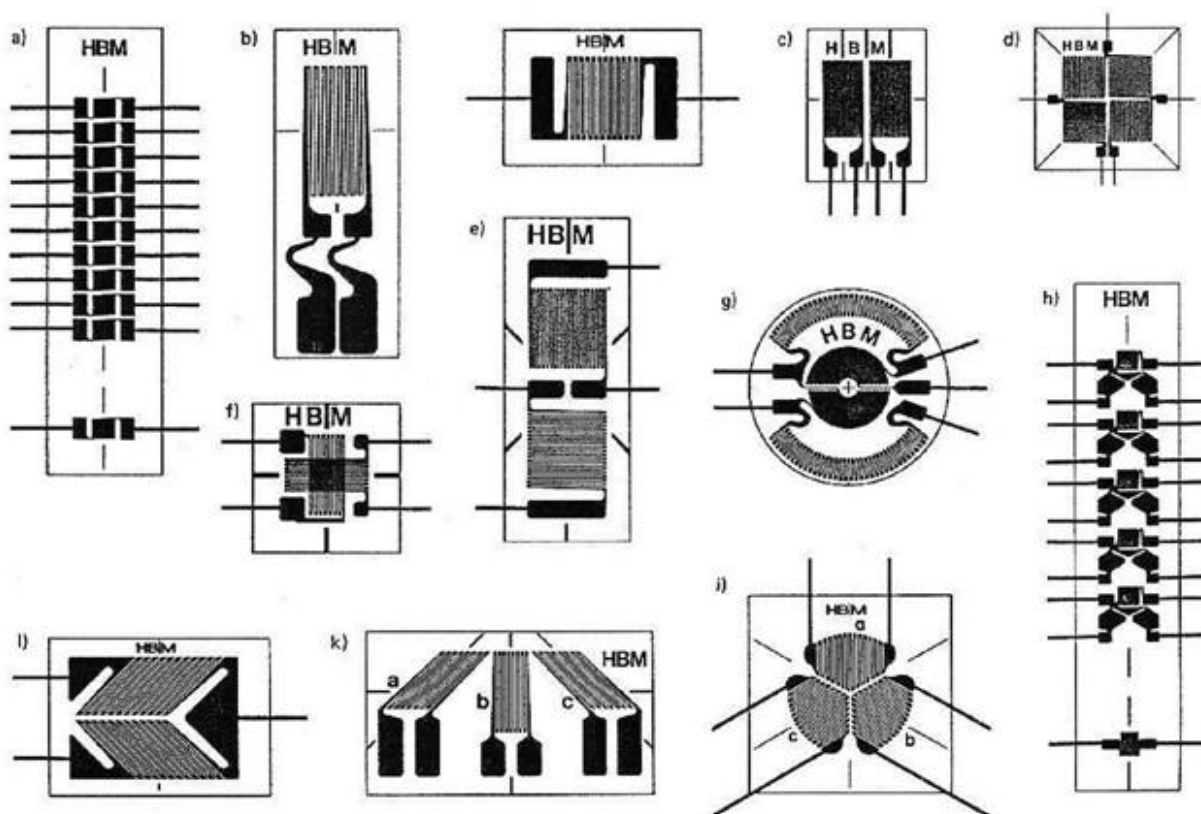
$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (5.8)$$

U praksi se najčešće rabe mjerne trake s vrijednostima faktora  $k$  kod metalnih žica u rasponu od 2,0 do 2,1, a kod poluvodiča  $k \cong 120$ , tablica 2.

Tablica 2. Materijali mjernih traka

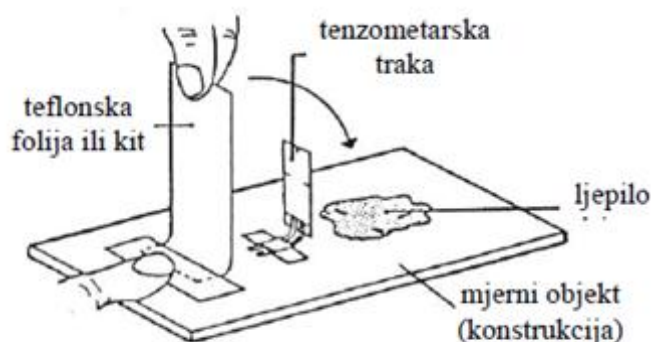
Oznaka	Sastav	$k$ – faktor	Napomena
Konstantan	57÷60 % Cu, 40÷30 % Ni	2,0 ÷ 2,1	najčešće u uporabi
Nichrome V	80 % Ni, 20 % Cr	2,2	za temperature do 650 °C
Chromel C	65 % Ni, 20 % Fe, 15 % Cr	2,5	
Karma	74 % Ni, 20 % Cr, 3 % Fe, 3 % Al	2,0	vrlo stabilan
Izoelastik	52 % Fe, 36 % Ni, 8 % Cr, V, 0,5 % Mo, 3,5 % Mn, Si, Cu	3,6	za dinamička mjerenja
Poluvodič	Silicij, tip p	110 ÷ 130	za laboratorijska mjerenja
Poluvodič	Silicij, tip n	-80 ÷ -100	

Duljine mjernih traka kreću se od 0,6 pa sve do 120 mm i više, a njihov električni otpor može iznositi 120  $\Omega$ , 350  $\Omega$  ili 600  $\Omega$ . Danas se najčešće rabe trake od konstantana duljine 6 do 10 mm i otpora 120  $\Omega$ . Različite izvedbe mjernih traka prikazane su na slici 11.



Slika 11. Različiti tipovi elektrootporničkih mjernih traka i rozeta

Mjerna traka se pričvršćuje na očišćenu površinu ispitnog objekta specijalnim ljepilom kako to prikazuje slika 12. Postavljanje mjerne trake ovisi o smjeru deformacije na površini objekta koji se ispituje. Kod jednoosnih mjernih traka treba paziti da glavno naprezanje djeluje uzduž trake.



Slika 12. Lijepljenje mjerne trake na ispitni objekt

Kod mjerenja na više mjesta konstrukcije, potrebno je sva mjerna mjesta spojiti na preklopnik pomoću kojeg se jedna po jedna tenzometarska traka uključuje u krug mjernog mosta i pri tom bilježi deformacija kod određenog opterećenja. Ove vrijednosti se oduzimaju ili zbrajaju s nul-vrijednostima očitanim u neopterećenom stanju i na taj se način određuju vrijednosti deformacija u svim mjernim točkama ispitivanog objekta (npr. na plaštu ili nosačima kuglastog spremnika, cisterni za transport ukapljenih plinova, na dijelovima željezničkih ili cestovnih vozila, na kućištu visokotlačnih ventila, na nosačima mostova, dizalicama i dr).

Za mjerenja na konstrukcijama izloženim ravninskom stanju naprezanja (npr. plašt cilindričnog spremnika) potrebna su najmanje dva tenzometra postavljena međusobno okomito i to u slučaju da su poznati glavni pravci naprezanja. Mjerenjem glavnih deformacija  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$ , pomoću Hookeovog zakona mogu se izračunati glavna naprezanja  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  u ispitnoj točki konstrukcije temeljem izraza:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu_p^2} (\varepsilon_1 + \nu_p \cdot \varepsilon_2), \quad (5.9)$$

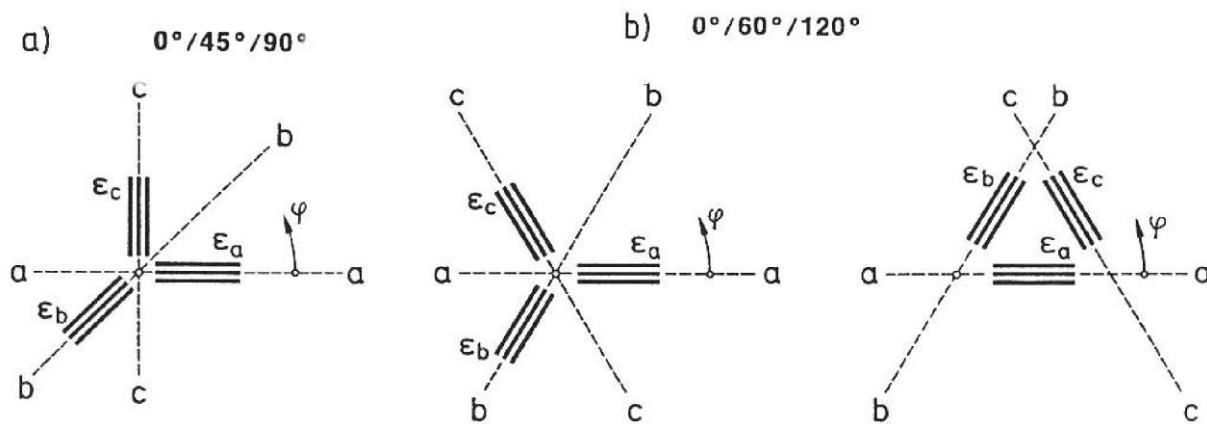
$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu_p^2} (\varepsilon_2 + \nu_p \cdot \varepsilon_1) \quad (5.10)$$

gdje je :

$E$  – modul elastičnosti;

$\nu_p$  – Poissonov koeficijent.

Ako u točki konstrukcije u kojoj vlada ravninsko stanje naprezanja nisu poznati pravci glavnih naprezanja, potrebno je mjeriti deformacije u tri smjera. Za takva mjerenja rabe se mjerne rozete tipa:  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  ili  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ , slika 13. Rozetu čine tri tenzometra postavljena pod određenim kutom.



Slika 13. Vrste mjernih rozeta

Vrijednosti glavnih naprezanja  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$ , te pravci glavnih naprezanja u ispitnoj točki objekta, izračunavaju se na temelju izmjerenih deformacija  $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$  i to kako slijedi:

a) za rozetu  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ :

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu_p} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{(1-\nu_p)\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_c - \varepsilon_b)^2} \quad (5.11)$$

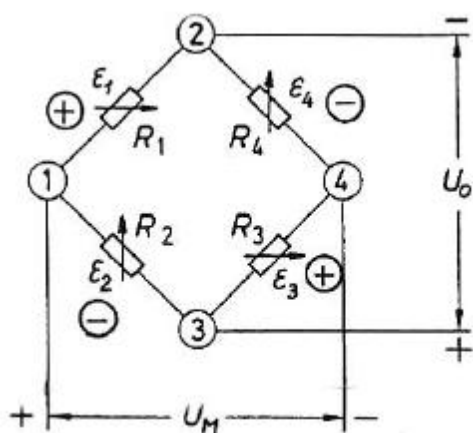
b) za rozetu  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$ :

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{1-\nu_p} \cdot \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{2} \pm \frac{E}{1+\nu_p} \cdot \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2} \quad (5.12)$$

Za mjerenje zaostalih naprezanja koriste se posebne vrste mjernih rozeta koje se mogu naći u programima specijaliziranih proizvođača mjerne opreme kao što je primjerice renomirana tvrtka HBM ("Hottinger Baldwin Messtechnik") u Njemačkoj.

### 5.2.2. Mjerenje u spoju Wheatstoneovog mjernog mosta

Za mjerenje promjene otpora tenzometra  $\Delta R$  upotrebljavaju se najčešće dva instrumenta: potencijometar i mjerni most. Mjerni signal pretvornika (tenzometarska mjerna traka) dovodi se u mosni spoj, kako bi se izmjerila vrijednost promijene napona. Ona se određuje iz razlike potencijala između spojišta grana mosnog spoja. U tu se svrhu mogu koristiti svi električni mosni spojevi koji se koriste za mjerenje električnog otpora, a u primjeni se najčešće nalazi Wheatstoneov most prikazan na slici 14.



Slika 14. Wheatstoneov mjerni most

$U_0$  – konstantni ulazni istosmjerni napon,

$U_M$  – mjereni napon (mjerni signal),

2, 3 – napojna dijagonala mosta,

1, 4 – mjerna dijagonala mosta,

$R_1...R_4$  – otpori tenzometarskih mjernih traka,

$\varepsilon_1... \varepsilon_4$  – duljinske deformacije mjernih traka

Uz primjenu Kirchhoffovih zakona za Wheatstoneov most vrijednost izlaznog napona slijedi iz jednadžbe:

$$U_M = U_0 \cdot \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = U_0 \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + \Delta R_2) \cdot (R_3 + \Delta R_4)}. \quad (5.13)$$

Mjerni most je u ravnoteži samo, ako je  $U_M = 0$  ili je zadovoljen omjer otpora pretvornika:  $R_1 / R_2 = R_4 / R_3$ .

Ako se vrijednosti otpora  $R_1... R_4$  promijene za  $\Delta R$ , ravnoteža mosta se poremeti i između točaka 1 i 4 pojavit će se razlika potencijala tj. izlazni napon  $U_M$ .

Omjer izlazne i ulazne vrijednosti napona može se prikazati jednadžbom:

$$\frac{U_M}{U_0} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4}. \quad (5.14)$$

U mjernoj tehnici rabe se tenzometri (mjerne trake) čije su promjene otpora vrlo male, reda veličine  $10^{-3} \Omega$ . U tom slučaju vrijedi slijedeći izraz:

$$\frac{U_M}{U_0} \approx \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (5.15)$$

Zamijene li se relativne promjene otpora umnoškom  $k \cdot \varepsilon$  gornji izraz poprima oblik:

$$\frac{U_M}{U_0} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (5.16)$$

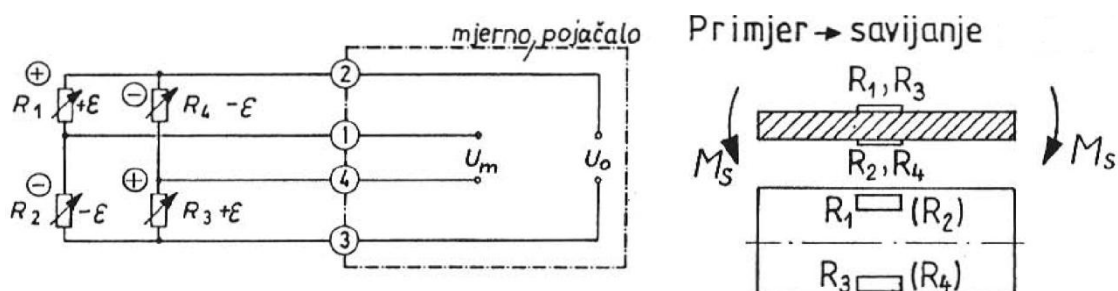
Mjerni signal na izlazu bit će pozitivan kada je  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$  i/ili je  $\varepsilon_3 > \varepsilon_4$ , odnosno negativan ukoliko je  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$  i/ili je  $\varepsilon_3 < \varepsilon_4$ .

U svaki Wheatstoneov most mogu se spojiti četiri aktivna pretvornika (četiri aktivne mjerne trake) i tada se govori o punom mostu, zatim dvije mjerne trake (polu-most) ili samo jedna aktivna traka koja čini četvrtinski most.

**Puni most:** sve četiri grane mosta sadrže aktivne mjerne trake (slika 15) koje se lijepe na ispitni objekt tako da dvije i dvije grane imaju jednake deformacije, ali suprotnog predznaka. U tom slučaju mjereni signal na izlazu odnosno vrijednost deformacije određuju slijedeći izrazi:

$$U_M = U_0 \cdot \frac{k}{4} \cdot 4 \cdot \varepsilon = U_0 \cdot k \cdot \varepsilon \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{U_M}{U_0} \quad (5.17)$$

Veličina mjerenog signala direktno je proporcionalna srednjoj vrijednosti duljinskih deformacija.



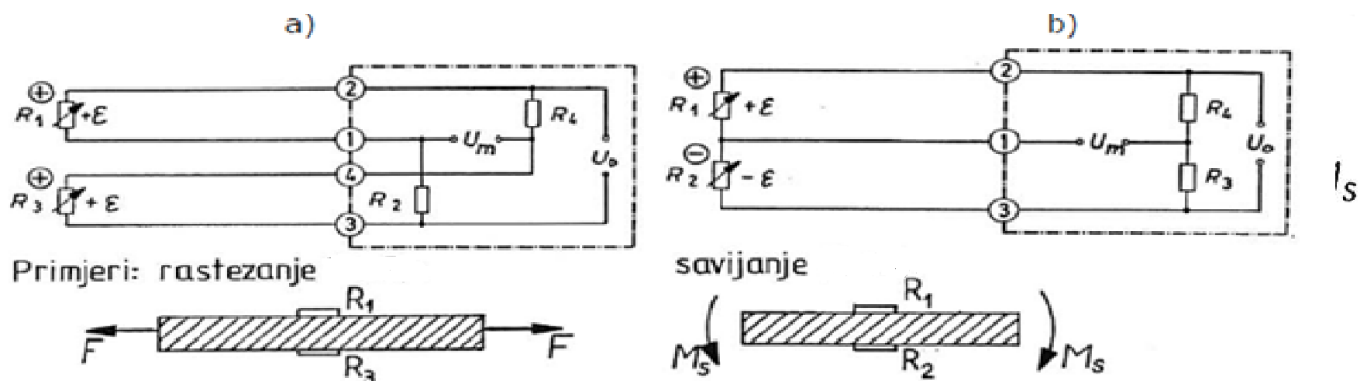
Slika 15. Tenzometri (mjerne trake) u spoju punog mjernog mosta i primjer uporabe

**Polu-most** se izvodi s dvije aktivne mjerne trake i dvije trake koje predstavljaju pasivni otpor.

Na izlazu iz polu-mosta veličina mjerenog signala je:

$$U_M = U_0 \cdot \frac{k}{4} \cdot 2 \cdot \varepsilon = U_0 \cdot \frac{k}{2} \cdot \varepsilon \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{2}{k} \cdot \frac{U_M}{U_0} \quad (5.18)$$

Na slici 16 prikazana su dva primjera polu-mosta. U prvom primjeru na slici 16a) dvije aktivne mjerne trake izložene su jednakom naprezanju po iznosu i smjeru dok se u drugom primjeru prikazanom na slici 16b) radi o istim naprezanjima, ali suprotnog predznaka.

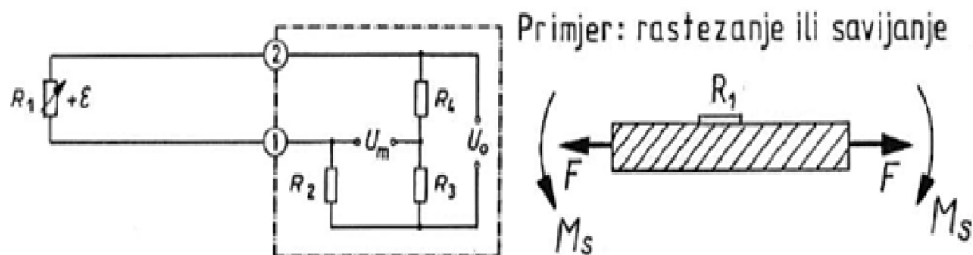


Slika 16. Tenzometri (mjerne trake) u spoju polu-mosta i primjeri uporabe

Kod korištenja ovakvih mjernih spojeva mora se voditi briga o temperaturnoj kompenzaciji, tj. utjecaju okolišne temperature.

**Četvrtinski most** sadrži samo jednu aktivnu mjernu traku (slika 17). U tom su slučaju ostale tri trake konstantni pasivni otpori. Na izlazu iz četvrtinskog mosta mjereni signal je:

$$U_M = U_0 \cdot \frac{k}{4} \cdot \varepsilon \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_M}{U_0} \quad (5.19)$$

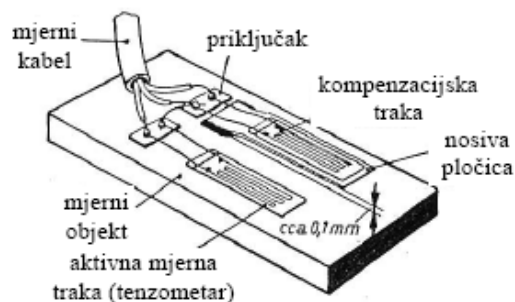


Slika 17. Tenzometarska (mjerna traka) u spoju četvrtinskog mosta i primjer uporabe

Kod mjerenja u spoju polu-mosta i četvrtinskog mosta obvezno treba eliminirati utjecaj promjene temperature, te priključnih vodova (kabela) i njihovih otpora.

Temperaturni utjecaj na promjenu otpora mjerne trake eliminira se pomoću kompenzacijske trake u susjednoj grani mosta. To je obično identična tenzometarska traka zalijepljena na posebnu pločicu od istog materijala kao i mjerni objekt, ali nije izložena naprezanju već samo promijeni temperature, slika 18. Kod mjerenja u spoju polu-mosta koriste se dvije kompenzacijske trake, a kod spoja četvrtinskog mosta rabi se samo jedna kompenzacijska traka [19].





Slika 18. Uporaba kompenzacijske mjerne trake

### 5.2.3. Mjerno pojačalo

Mjerno pojačalo je jedan od glavnih elemenata svakog mjernog sustava, a služi za registriranje i pojačanje signala koji dolazi s pretvornika.

Električni signal što ga daje većina mjernih pretvornika obično je vrlo malog napona ili struje, a uz to može biti i neznatne snage. Zato je takve signale potrebno pojačati radi dalje uspješne obrade. To se postiže pomoću pojačala. Općenito se takva pojačala nazivaju mjernim, da bi se istaknula njihova posebnost s obzirom na točnost i pouzdanost rada. Izbor karakteristika mjernih pojačala posebno je važan za kvalitetu mjerenja.

Mjerna pojačala moraju biti usklađena s karakteristikama pretvornika. Ona ne smiju izobličavati statičku ili dinamičku karakteristiku pretvornika niti ga smiju električki opterećivati. Zato mjerna pojačala moraju biti visokog ulaznog otpora, mnogo većeg od izlaznog otpora pretvornika, kako iz njega ne bi crpila struju [20].

Razlikuju se slijedeće vrste pojačala:

- naponsko pojačalo:  $A = U_{iz}/U_{ul}$  (V/V); (5.20)

- strujno pojačalo:  $A = I_{iz}/I_{ul}$  (A/A); (5.21)

- strminsko pojačalo:  $A = I_{iz}/U_{ul}$  (A/V=S); (5.22)

- otporno pojačalo:  $A = U_{iz}/I_{ul}$  (V/A=Ω). (5.23)

gdje su:

A – pojačanje,

$U_{ul}$  – ulazni napon (V),

$U_{iz}$  – izlazni napon (V),

$I_{ul}$  – ulazna struja (A),

$I_{iz}$  – izlazna struja (A).

Karakteristike mjernih pojačala općenito su slijedeće:

- pojačanje vrlo slabih istosmjernih ili izmjeničnih (mjernih) signala;
- veliki ulazni otpor pri mjerenju napona, mali ulazni otpor pri mjerenju struje;
- stalno pojačanje u određenom frekvencijskom pojasu, vremenski i temperaturno neovisno;
- izlazni signal jednoznačno određen vrijednošću ulaznog signala [21].

Frekvencijski pojas predstavlja raspon frekvencija unutar kojeg pojačalo ima stalno pojačanje izmjeničnog ulaznog signala. Ovaj pojas određuju donja i gornja granična frekvencija:  $f_d$  i  $f_g$ . Kod istosmjernih pojačala donja granična frekvencija jednaka je 0 [21].

### 5.2.3.1. Filtriranje signala

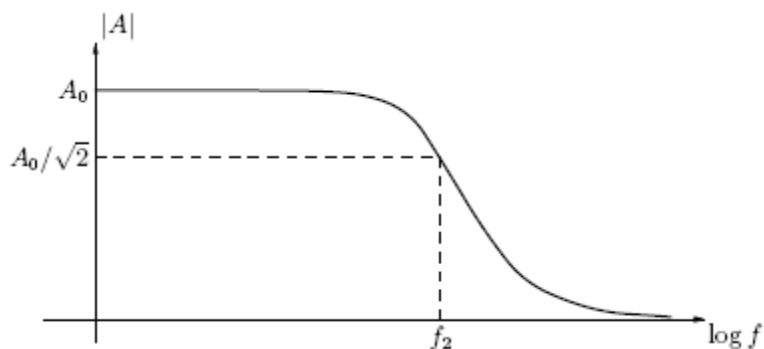
Smetnje ili šumovi koji se javljaju tijekom mjerenja mogu se eliminirati kvalitetnim uzemljenjem ili metalnim oklopom (Faradayev kavez!). Međutim, u većini slučajeva poželjno je imati kontrolu nad područjem frekvencija koje se želi eliminirati odnosno propustiti. To se postiže pomoću sklopova koji se nazivaju *filtri*, te s obzirom na frekvencijsku karakteristiku dijele se na:

- a) niskopropusne ("*low pass filter*");
- b) visokopropusne ("*high pass filter*");
- c) pojasno propusne ("*band pass filter*");
- d) pojasno nepropusne ("*band reject filter*");
- e) uskopojasne (rezonantne) ("*narrow band filter*") [23].

Niskopropusni i visokopropusni filtri s pasivnim komponentama odgovaraju sklopovima za integriranje i integriranje s pasivnim elementima. Razlika je u tome što kod filtra odziv sklopa, tj. njegovo pojačanje promatramo za sinusoidnu pobudu.

### 5.2.3.2. Niskopropusni filter

Frekvencijska karakteristika niskopropusnog filtra prikazana je dijagramom pojačanje (A)-frekvencija (f) na slici 19.

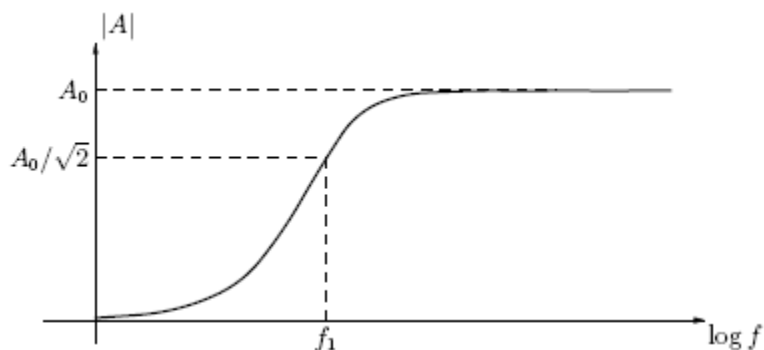


Slika 19. Frekvencijska karakteristika niskopropusnog filtra

Kod ovog filtra donja granična frekvencija jednaka je nuli te on pojačava signale frekvencija samo do gornje granične vrijednosti  $f_2$ .

#### 5.2.3.3. Visokopropusni filter

Donja granična frekvencija ( $f_1$ ) visokopropusnog filtra (slika 20) predstavlja onu frekvenciju pri kojoj pojačanje iznosi  $1/\sqrt{2}$  s obzirom na pojačanje u području viših frekvencija.

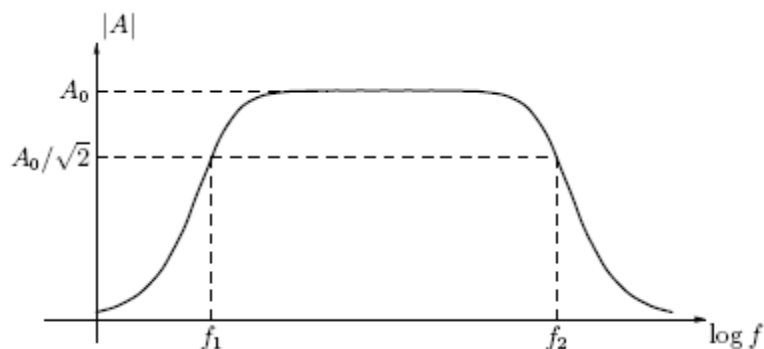


Slika 20. Frekvencijska karakteristika visokopropusnog filtra

#### 5.2.3.4. Pojasno propusni filter

Kombinacijom niskopropusnog i visokopropusnog filtra dobiva se tzv. *Pojasno propusni filter*.

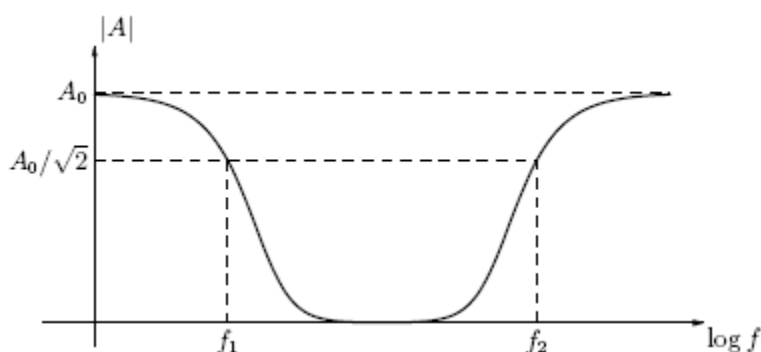
Njegova frekvencijska karakteristika prikazana je slikom 21. Ovaj filter dobro propušta samo signale frekvencija većih od  $f_1$  i manjih od  $f_2$ . Zato se po dogovoru upravo frekvencije  $f_1$  i  $f_2$  uzimaju kao granične frekvencije koje određuju područje propusnosti ovog filtra.



Slika 21. Frekvencijska karakteristika pojasno propusnog filtra

### 5.2.3.5. Pojasno nepropusni filter

Pojasno nepropusni filter po definiciji propušta sinusoidni signal svih frekvencija osim onih koje se nalaze u području između  $f_1$  i  $f_2$ . Frekvencijska karakteristika ovog filtra vidljiva je na slici 22. On je na neki način komplementaran pojasno propusnom filteru. Pojasno nepropusni filter dobro propušta samo signale frekvencija manjih od  $f_1$  i većih od  $f_2$ . U tom smislu njegov frekvencijski opseg također određuju granične frekvencije  $f_1$  i  $f_2$ .

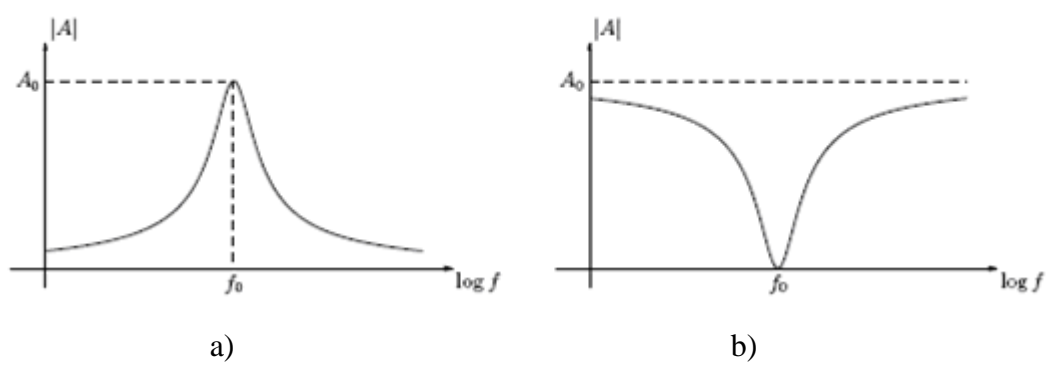


Slika 22. Frekvencijska karakteristika pojasno nepropusnog filtra

### 5.2.3.6. Uskopojasni filter

Uskopojasni filteri su sklopovi koji propuštaju ili blokiraju signale u uskom frekvencijskom području. Takvi filteri nazivaju se još i rezonantnim filterima, jer se propuštanje odnosno blokiranje pojedinih frekvencija uglavnom vrši rezonantnim sklopovima.

Tipičan takav sklop je LCR krug (zavojnica, kondenzator i otpornik), koji se može smatrati uskopojasnim filtrom s najvećom propusnošću pri frekvenciji  $f_0$ , slika 23[23].



Slika 23. Frekvencijska karakteristika uskopoasnog filtra

## **6. UMJERAVANJE POSREDNČKIH ETALONA SILE PREMA NORMI EN ISO 376**

### **6.1. Općenito**

Pravila za umjeravanje etalona sile prema normi EN ISO 376 odnose se na one etalone koji se koriste za umjeravanje jednoosnih kidalica [12].

Pod pojmom etalona sile podrazumijeva se čitav sklop koji se u osnovi sastoji od dinamometra, mjernog pojačala i uređaja za očitavanje. Pojačalo i uređaj za očitavanje najčešće čine jedan sklop. Sve ove komponente fizički su povezane kabelima. Svi dijelovi etalona sile moraju se moći zasebno identificirati te vrijednost nazivne sile mora biti vidljivo označena. Dinamometar i prihvatni dijelovi koji služe za opterećivanje moraju biti tako konstruirani i dimenzionirani da omogućuju aksijalni prihvat sile (bilo vlačne ili tlačne).

Deformaciju elastičnog elementa moguće je mjeriti na više načina: mehaničkim putem, električkim, optičkim ili na neki drugi prikladan način, ali je pritom nužno osigurati potrebnu točnost mjerenja. Način i kvaliteta mjerenja deformacije mogu utjecati na rezultate mjerenja, a time i na klasifikaciju ispitivanog etalona.

### **6.2. Priprema za umjeravanje**

Prije umjeravanja potrebno je provjeriti da li se etalon može umjeriti. To se radi kroz preliminarne testove kao što je test preopterećenja, ispitivanja s obzirom na prihvat sile te provjere utjecaja variranja napona. Kod testa preopterećenja etalon se četiri puta zaredom izlaže preopterećenju koje treba biti veće od nazivne sile najmanje za 8%, a najviše 12%. Trajanje svakog preopterećenja mora iznositi 1 do 1,5 minute. Barem jedan takav test proizvođač treba izvršiti prije nego što etalon pusti u uporabu.

Osim toga kod vlačnih dinamometara treba osigurati da priključni dijelovi omogućuju aksijalnu primjenu sile, a kod tlačnih dinamometara da nema interakcije između dinamometra i njegove potpore na uređaju za umjeravanje. Da bi se to provjerilo na dinamometar se stavljaju različite tlačne ploče: konkavne, konveksne i ravnog oblika. Za svaku ploču dinamometar se opterećuje s dvije ispitne sile, prvoj koja odgovara nazivnoj sili i drugoj jednakoj najmanjoj umjeravanoj sili.

Ispitivanje se ponavlja kako bi se načinile tri primjene minimalne i maksimalne sile za svaki od tri tipa tlačnih podložaka. Za svaku silu razlika između srednjih vrijednosti očitavanja dobivenih za konkavnu i ravnu ploču odnosno konveksnu i ravnu ploču ne smije prijeći granične vrijednosti navedene u tablici 3.

Tablica 3. Maksimalno dozvoljena razlika srednjih očitavanja

Klasa	Maksimalno dozvoljena razlika, %	
	kod maksimalne sile	kod minimalne sile
00	0,05	0,1
0,5	0,1	0,2
1	0,2	0,4
2	0,4	0,8

Tijekom preliminarnih ispitivanja treba još provjeriti da varijacije linijskog napona u iznosu od  $\pm 10\%$  ne utječu značajno na rezultate umjeravanja.

### 6.3. Rezolucija

Rezolucija ( $r$ ) je ona minimalna promjena ulazne veličine za koju se još može detektirati promjena izlazne veličine. U slučaju dinamometara rezolucija se određuje na slijedeći način:

Kod analogne skale udaljenosti susjednih oznaka na skali trebaju biti jednake, a debljina kazaljke mora odgovarati debljini oznaka. Rezolucija se određuje iz omjera širine kazaljke i središnje udaljenosti dviju susjednih oznaka (preporučeni omjeri su: 1:2, 1:5, 1:10). Kod digitalne skale rezolucija predstavlja jedan prirast zadnje aktivne znamenke brojanog pokazivača.

Rezolucija treba biti iskazana u mjernoj jedinici za silu. Ako očitavanja za neopterećeni uređaj variraju više od vrijednosti prije određene rezolucije ona je jednaka jednoj polovini raspona variranja.

#### 6.4. Minimalna sila

S obzirom na točnost kojom se može očitati deformacija na uređaju u toku umjeravanja ili tijekom daljnje uporabe, minimalna sila ( $F_{\min}$ ) koja se primjenjuje na etalon mora zadovoljiti dva uvjeta:

a) za određenu klasu minimalna sila mora iznositi:

- za klasu 00  $\geq 4000 \times r$
- za klasu 0,5  $\geq 2000 \times r$
- za klasu 1  $\geq 1000 \times r$
- za klasu 2  $\geq 500 \times r$

b) minimalna sila mora biti jednaka ili veća od  $0,02 \times F_f$ , ( $F_f$  – nazivna sila dinamometra).

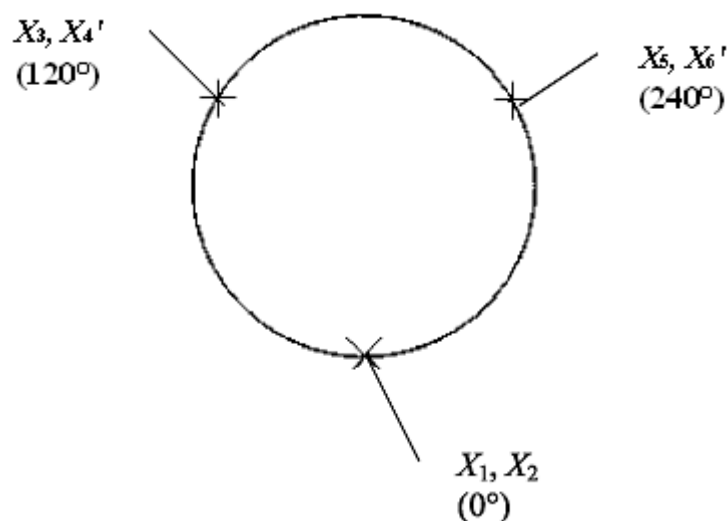
#### 6.5. Postupak umjeravanja

Umjeravanje se u osnovi sastoji od djelovanja poznatom silom na dinamometar i bilježenja vrijednosti očitanih na pokazivaču prijenosnog etalona.

Prije nego što se etalon optereti silama za umjeravanje u zadanom smjeru (tlak ili vlak), potrebno ga je predopteretiti. Na uređaj se treba djelovati tri puta maksimalnom silom, svaki puta u trajanju od 1 do 1,5 minute. Predopterećenja moraju biti u istom smjeru i moraju se primijeniti za položaj dinamometra identičan onomu kod opterećivanja u mjernim nizovima. Prije svake promjene smjera opterećenja u toku umjeravanja, potrebno je predopteretiti etalon u tom novom smjeru.

Silama za umjeravanje etalon se opterećuje u ukupno 6 mjernih nizova. Prva dva niza ( $X_1$  i  $X_2$ ) su nizovi rastućih ispitnih sila, bez da se mijenja položaj dinamometra (položaj  $0^\circ$ ). Zatim slijede još četiri niza ispitnih sila. Treći niz ( $X_3$ ) je rastući, a četvrti ( $X_4'$ ) padajući. Ovi nizovi imaju isti korak, a određuju se za položaj dinamometra rotiranog za kut od  $120^\circ$  s obzirom na početni položaj. Zatim se dinamometar zakreće za kut  $240^\circ$  od početnog položaja te se opterećuje petim nizom rastućih sila ( $X_5$ ) i šestim nizom padajućih sila ( $X_6'$ ), slika 24.





Slika 24. Položaj dinamometra pri umjeravanju

Da bi se mogla odrediti interpolacijska krivulja za rezultate umjeravanja, potrebno je da svaki niz sadrži barem osam mjernih točaka različitih iznosa sile, a one trebaju biti što ravnomjernije raspoređene unutar raspona mjernog niza.

U svakom mjernom nizu bilježe se i nulta očitavanja kad sila ne djeluje, i to prije početka djelovanja sile i nakon primjene sile u vremenu 30 sekundi nakon što je sila potpuno uklonjena. Razmak između susjednih nizova mjerenja treba iznositi barem 3 minute. Značajnija promjena nulnih očitavanja može ukazivati na plastičnu deformaciju dinamometra uslijed preopterećenja. Vremenski intervali između mjernih točaka unutar jednog mjernog niza trebaju biti što sličniji, a očitavanja bi se trebala uzeti 30 sekundi nakon početka djelovanja opterećenja.

U toku umjeravanja etaloni koji sadrže odvojive dijelove trebaju se barem jednom rastaviti, što se najčešće čini između drugog i trećeg niza, a nakon sastavljanja potrebno je ponovno etalon predopteretiti maksimalnom silom i to barem tri puta.

Temperatura u toku umjeravanja treba biti između 18 i 28 °C i mora ostati stabilna unutar granica od  $\pm 1^\circ$  C. Potrebno je osigurati dovoljan vremenski period da bi etalon postigao stabilnu temperaturu. Vrijednost ispitne temperature treba zabilježiti u ispitnom izvješću.

## 6.6. Kriteriji ocjenjivanja

Kriteriji za klasifikaciju etalona sile, sukladno normi EN ISO 376, jesu sljedeći:

- relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije,
- relativna pogreška obnovljivosti sa rotacijom,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna pogreška histereze.

**Relativna pogreška obnovljivosti sa rotacijom ( $b$ )** računa se za svaku umjeravanu silu temeljem sljedećeg izraza:

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\overline{X}_r} \right| \times 100 \quad (6.1)$$

gdje je:

$X_{\max}$  - maksimalna vrijednost izmjerena u nizovima 1, 3 i 5,

$X_{\min}$  - minimalna vrijednost izmjerena u nizovima 1, 3 i 5,

$\overline{X}_r$  - srednja vrijednost očitavanja u nizovima sa rotacijom:

$$\overline{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$$

(6.2)

$X_1$ ,  $X_3$  i  $X_5$  jesu vrijednosti očitavanja u mjernim nizovima 1, 3 i 5.

**Relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije ( $b'$ )** također se računa za svaku umjeravanu silu na temelju rezultata izmjerenih u nizovima 1 i 2:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\overline{X}_{wr}} \right| \times 100 \quad (6.3)$$

gdje je:

$X_1$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 1,

$X_2$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 2,

$\overline{X}_{wr}$  - srednja vrijednost očitavanja u nizovima bez rotacije:

$$\overline{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (6.4)$$

**Relativno interpolacijsko odstupanje ( $f_c$ )** određuje se na temelju polinoma 3. stupnja koji određuje ovisnost izlaznog signala o sili. Ovaj polinom dobiva se iz rezultata mjerenja. Relativna pogreška interpolacije pokazuje koliko dobro točke interpolirane polinomom aproksimiraju stvarne podatke umjeravanja. Pogreška  $f_c$  se računa pomoću izraza:

$$f_c = \frac{X_r - X_a}{X_a} \times 100 \quad (6.5)$$

gdje je:

$X_r$  - srednja vrijednost očitavanja u nizovima sa rotacijom,

$X_a$  - interpolirana vrijednost.

**Relativno odstupanje nul vrijednosti ( $f_o$ )** dobiva se iz očitavanja nul signala prije i poslije svakog predopterećenja odnosno prije i poslije svakog mjernog niza:

$$f_o = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 \quad (6.6)$$

gdje je:

$i_f$  - očitavanje na pokazivaču dinamometra nakon rasterećenja,

$i_0$  - očitavanje na pokazivaču dinamometra prije opterećenja,

$X_N$  - izmjerena vrijednost očitavanja koja odgovara maksimalnoj sili umjeravanja.

Kod klasifikacije etalona u obzir se uzima najveće odstupanje nul vrijednosti.

**Relativna pogreška histereze ( $v$ )** određuje se za svako umjeravanje koje se provodi s rastućom i padajućom silom. Razlika između vrijednosti očitanih u rastućem i padajućem nizu za istu mjernu točku omogućuje određivanje relativne greške histereze kako slijedi:

$$v_1 = \left| \frac{X_4' - X_3}{X_3} \right| \times 100 \quad (6.7)$$

$$v_2 = \left| \frac{X_6' - X_5}{X_5} \right| \times 100 \quad (6.8)$$

gdje je:

$X_4'$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 4' padajućih ispitnih sila,

$X_3$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 3 rastućih ispitnih sila,

$X_6'$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 6' padajućih ispitnih sila,

$X_5$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 5 rastućih ispitnih sila.

Vrijednost relativne pogreške histereze  $v$  predstavlja aritmetičku sredinu od  $v_1$  i  $v_2$ .

Kod ove pogreške treba voditi računa da ona uključuje histerezu dinamometra, ali i histerezu etalonskog uređaja na kojem se provodi umjeravanje.

## 6.7. Klasifikacija etalona

Raspon za koji se etalon klasificira određuje se tako da se u obzir uzima svaka mjerna točka, jedna za drugom, počevši od maksimalne prema minimalnoj. Područje klasifikacije završava zadnjom silom za koju su još ispunjeni uvjeti klasifikacije. Raspon sila u kojem se etalon klasificira treba biti barem u području između 50 i 100 % maksimalne sile umjeravanja  $F_N$ .

Etalon se može klasificirati za točno određene vrijednosti sila ili za interpolirane vrijednosti.

Kod etalona klasificiranog za točno određene sile kriteriji ocjenjivanja su:

- relativna pogreška obnovljivosti i ponovljivosti,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna pogreška histereze.

Kod etalona klasificiranog za interpolirane vrijednosti u razmatranje se uzima:

- relativna pogreška obnovljivosti i ponovljivosti,
- relativno interpolacijsko odstupanje,
- relativno odstupanje nul vrijednosti,
- relativna pogreška histereze.

Prema vrijednostima zadanih kriterija određuje se klasa umjeravanog etalona, tablica 4. Da bi etalon u nekom području pripadao određenoj klasi, moraju istovremeno biti zadovoljeni svi traženi kriteriji. Ako samo jedan kriterij nije ispunjen, tada etalon pripada nižoj klasi određenoj vrijednošću tog kriterija.

Tablica 4. Karakteristike etalona sile

Klasa	Relativne pogreške, %					Nesigurnost primijenjene sile umjeravanja ( $k=2$ ), %
	$b$	$b'$	$f_c$	$f_0$	$\nu$	
<b>00</b>	0,05	0,025	$\pm 0,025$	$\pm 0,012$	0,07	$\pm 0,01$
<b>0,5</b>	0,10	0,05	$\pm 0,05$	$\pm 0,025$	0,15	$\pm 0,02$
<b>1</b>	0,20	0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,050$	0,30	$\pm 0,05$
<b>2</b>	0,40	0,20	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$	0,50	$\pm 0,10$

## 6.8. Potvrda o umjeravanju

Za etalon koji je zadovoljio u postupku umjeravanja prema ovoj normi izdaje se potvrda o umjeravanju koja mora sadržati barem sljedeće informacije:

- identifikacijske podatke svih dijelova prijenosnog etalona, prihvatne naprave kao i podatke o uređaju na kojem je umjeravanje provedeno,
- način primjene sile (vlak ili tlak),
- dokaz da je etalon u skladu sa zahtjevima preliminarnih testova,
- klasu i mjerno područje (ili specifične sile) za koje je etalon umjeren,
- datum, rezultate umjeravanja i ako je potrebno interpolacijsku jednadžbu,
- temperaturu pri kojoj je umjeravanje provedeno.

Potvrda o umjeravanju vrijedi najviše 26 mjeseci, nakon čega se etalon ponovo mora umjeriti. Etalon je potrebno umjeriti i ranije ako je bio opterećen silom većom od one u testu preopterećenja te nakon bilo kakvog popravka.

## 6.9. Primjena umjerenih etalona

Etalon se treba opterećivati u skladu s uvjetima pod kojima je umjeren. Da bi se izbjeglo preopterećivanje silama većim od maksimalne umjeravane sile potrebno je poduzeti određene mjere zaštite. Uređaji koji su klasificirani za točno određene vrijednosti sile, trebaju se koristiti samo za te sile, dok uređaji koji su klasificirani za interpolaciju mogu se koristiti za bilo koje vrijednosti sila unutar interpolacijskog područja.

Ako se etalon koristi na temperaturi različitoj od one pri umjeravanju potrebno je očitavanja korigirati prema izrazu:

$$D_t = D_e \cdot [1 + K \cdot (\vartheta - \vartheta_e)] \quad (6.9)$$

gdje je:

$D_t$  – očitavanje na temperaturi  $\vartheta$ ,

$D_e$  – očitavanje pri temperaturi umjeravanja  $\vartheta_e$ ,

$K$  – temperaturni koeficijent za etalon izražen u jedinici  $1/^\circ\text{C}$  [24].

## 6.10. Procjena mjerne nesigurnosti kod umjeravanja posredničkih etalona

Procjena i proračun mjerne nesigurnosti kod umjeravanja posredničkih etalona sile temelji se na matematičkom modelu koji uključuje sljedeće sastavnice:

- najbolju umjernu i mjernu sposobnost LIMS-a;
- sastavljenu standardnu nesigurnost posredničkog etalona sile.

Stoga se proširena mjerna nesigurnost ( $W$ ) umjeravanja posredničkog etalona sile može iskazati izrazom:

$$W = k \times \sqrt{w_{din}^2 + w_{CMC}^2} \quad (6.10)$$

gdje je:

$k$  – faktor pokrivanja (za razinu povjerenja 95%:  $k=2$ ),

$w_{din}$  - sastavljena standardna nesigurnost dinamometra,

$w_{CMC}$  - umjerna i mjerna sposobnost laboratorija ( $w_{CMC-LIMS} = 0,025\%$ ) [25].

S obzirom na postignute vrijednosti pogrešaka pojedinih veličina koje ujedno čine i kriterije za klasifikaciju etalona slijede ulazne veličine za procjenu i proračun mjerne nesigurnosti rezultata umjeravanja. U tablici 5 pregledno su prikazani svi ulazni faktori i njihove razdiobe koje određuju sastavnice nesigurnosti.

Tablica 5. Sastavnice nesigurnosti

ULAZNA VELIČINA	RAZDIOBA	VARIJANCA	STANDARDNA DEVIJACIJA
Relativna pogreška nule	Pravokutna razdioba	$w_{nul}^2 = \frac{a_{nul}^2}{3}$	$w_{nul} = \frac{a_{nul}}{\sqrt{3}}$
Ponovljivost bez rotacije	Pravokutna razdioba	$w_{pon}^2 = \frac{a_{pon}^2}{3}$	$w_{pon} = \frac{a_{pon}}{\sqrt{3}}$
Obnovljivost s rotacijom	U – razdioba	$w_{obn}^2 = \frac{a_{obn}^2}{2}$	$w_{obn} = \frac{a_{obn}}{\sqrt{2}}$
Pogreška interpolacije	Trokutna razdioba	$w_{int}^2 = \frac{a_{int}^2}{6}$	$w_{int} = \frac{a_{int}}{\sqrt{6}}$
Relativna pogreška rezolucije	Pravokutna razdioba	$w_{rez}^2 = \frac{a_{rez}^2}{3}$	$w_{rez} = \frac{a_{rez}}{\sqrt{3}}$
Relativna pogreška histereze	Pravokutna razdioba	$w_{hist}^2 = \frac{a_{hist}^2}{3}$	$w_{hist} = \frac{a_{hist}}{\sqrt{3}}$

U tablici 5 veličina  $a$  predstavlja relativnu poluširinu maksimalnog odstupanja određene ulazne veličine.

Sastavljena standardna nesigurnost etalona sile ( $w_{din}$ ) predstavlja pozitivnu vrijednost drugog korijena zbroja kvadrata svih standardnih nesigurnosti izračunatih iz rezultata umjeravanja:

$$w_{din} = \sqrt{w_{nul}^2 + w_{pon}^2 + w_{obn}^2 + w_{int}^2 + w_{rez}^2 + w_{hist}^2} \quad (6.11)$$

gdje je:

$w_{nul}$  - nesigurnost nultog odstupanja,

$w_{pon}$  - nesigurnost ponovljivosti bez rotacije,

$w_{obn}$  - nesigurnost obnovljivosti sa rotacijom,

$w_{int}$  - nesigurnost interpolacijskog odstupanja,

$w_{rez}$  - nesigurnost rezolucije uređaja za očitavanje,

$w_{hist}$  - nesigurnost histereze.

### Nesigurnost obnovljivosti

Komponenta nesigurnosti uslijed obnovljivosti ( $w_{obn}$ ) može se definirati kao standardna devijacija srednjih vrijednosti očitavanja u mjernim nizovima sa rotacijom ( $X_1, X_3, X_5$ ) te je izražena kao relativna vrijednost slijedećim izrazom:

$$w_{obn} = \frac{1}{|\overline{X_r}|} \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1,3,5} (X_i - \overline{X_r})^2} \quad (6.12)$$

gdje je:

$X_i$  - vrijednost očitavanja u mjernim nizovima 1,3 i 5;

$\overline{X_r}$  - srednja vrijednost očitavanja za mjerne nizove 1,3 i 5.

### Nesigurnost ponovljivosti

Komponenta nesigurnosti uslijed ponovljivosti očitavanja ( $w_{pon}$ ) u prvom i drugom mjernom nizu  $X_1$  i  $X_2$  određuje se prema izrazu:

$$w_{pon} = \frac{b'}{100 \cdot \sqrt{3}} \quad (6.13)$$

gdje je  $b'$  relativna pogreška ponovljivosti u nizovima bez rotacije.

### Nesigurnost rezolucije

Komponenta nesigurnosti uslijed rezolucije uređaja za očitavanje ( $w_{rez}$ ) definirana je jednačbom:

$$w_{rez} = \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \frac{r}{F} \quad (6.14)$$

gdje je:

$r$  – rezolucija pokazivača,

$F$  – vrijednost sile na mjernoj točki.

### Nesigurnost nule

Veličina koja definira ovu komponentu nesigurnosti je relativna pogreška nule pa se shodno tome nesigurnost nultog odstupanja ( $w_{nul}$ ) određuje izrazom:



$$w_{nul} = \frac{F_{\min}}{F} \cdot \frac{f_0}{100} \quad (6.15)$$

gdje je:

$F_{\min}$  - najmanja vrijednost umjeravane sile,

$F$  - primijenjena sila,

$f_0$  - relativna pogreške nule.

### Nesigurnost interpolacije

Komponenta nesigurnosti uslijed interpolacije  $w_{\text{int}}$  ne uzima se u obzir kod proračuna mjerne nesigurnosti posredničkih etalona sile klasificiranih za točno određene vrijednosti sila. U slučajevima kada se koristi interpolacijska krivulja ova se nesigurnost mora uzeti u obzir jer vrijednosti pri određenim silama dobivene interpolacijskom krivuljom nisu idealne što povlači za sobom i stanovitu nesigurnost.

Komponenta nesigurnosti uslijed interpolacije predstavlja apsolutnu vrijednost razlike srednje vrijednosti očitavanja u mjernim nizovima sa rotacijom ( $\overline{X}_r$ ) i interpolirane vrijednosti ( $X_a$ ) podijeljene sa srednjom vrijednošću za nizove 1,3 i 5:

$$w_{\text{int}} = \left| \frac{\overline{X}_r - X_a}{\overline{X}_r} \right| \quad (6.16)$$

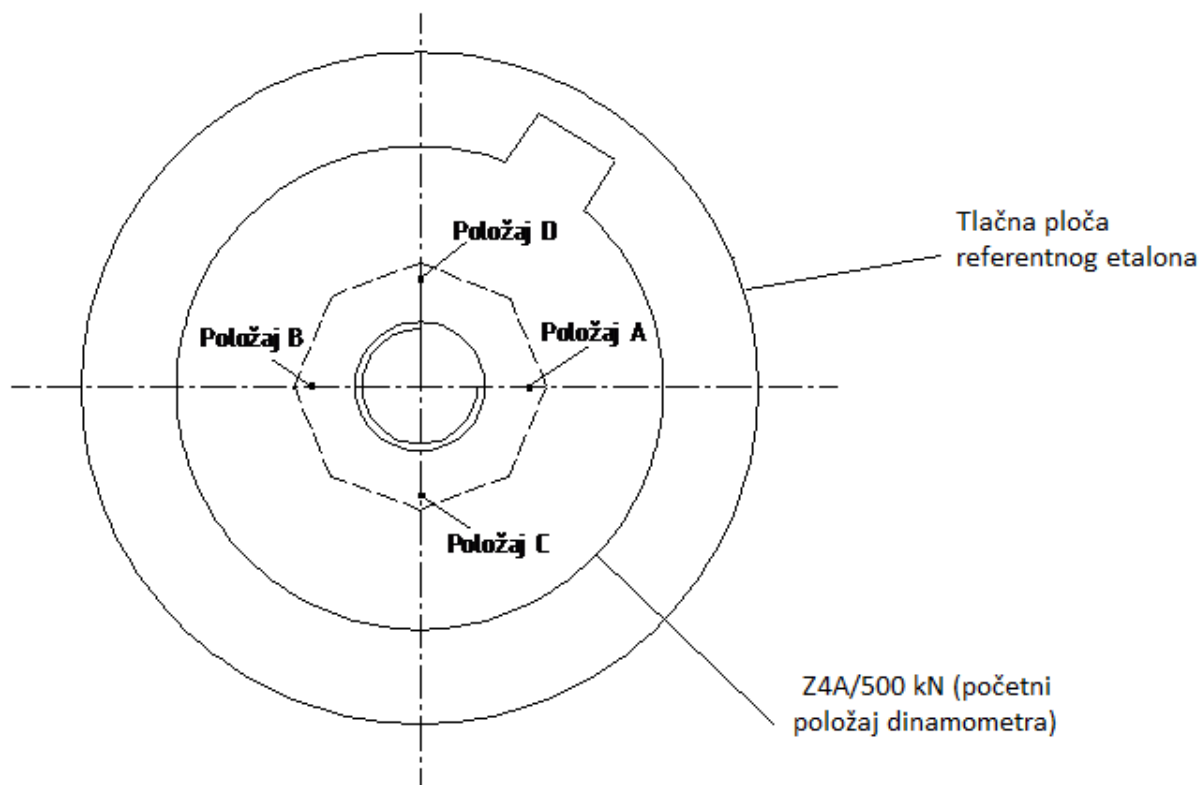
### Nesigurnost histereze

Procjena nesigurnosti uslijed postojanja histereze ( $w_{\text{hist}}$ ) temelji se na pravokutnoj razdiobi [26].

## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

### 7.1. Plan eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu ovog diplomskog rada proveden je postupak umjeravanja posredničkog etalona sile tipa Z4A nazivne vrijednosti 500 kN. Umjeravanje je provedeno na tlak pri čemu je posrednički etalon pozicioniran u pet različitih položaja. Prvo umjeravanje je načinjeno u aksijalnoj osi opterećenja referentnog etalona, a kod ostala četiri dinamometar je izmaknut od centra tlačne ploče za 60 mm u x i y smjeru (slika 25) kako bi se analizirala simetričnost raspodjele opterećenja referentnog etalona.



Slika 25. Pozicije dinamometra Z4A/500 kN

Umjeravanje posredničkog etalona provedeno je u skladu s normom EN ISO 376. U svakom položaju dinamometar je predopterećen tri puta maksimalnom silom nakon čega su uslijedili mjerni nizovi 1 i 2, pa je dinamometar rotiran za kut  $120^\circ$  kako bi se provela mjerenja u nizovima 3 i 4' i zatim dodatno zakrenut za još  $120^\circ$  pri čemu su uslijedila mjerenja u nizovima 5 i 6'. U nizovima 1, 2, 3 i 5 dinamometar je opterećivan rastućim ispitnim silama, dok je kod 4' i 6' to bila padajuća ispitna sila. Svaki mjerni niz sadržao je 10 mjernih točaka ravnomjerno

raspoređenih unutar područja 0 do 500 kN. Za svaku vrijednost umjeravane sile bilježila se vrijednost očitavanja na pokazivaču posredničkog etalona izražena u mV/V. Također je bilo potrebno zabilježiti vrijednosti nule u rasterećenom stanju i to prije i poslije svakog predopterećenja odnosno mjernog niza.

Nakon provedenih umjeravanja posredničkog etalona u pet različitih položaja rezultati mjerenja su detaljno obrađeni i analizirani s ciljem da bi se mogli donijeti određeni zaključci o simetričnosti raspodjele opterećenja te o njegovom utjecaju na karakteristične pogreške posredničkog etalona.

## **7.2. Karakteristike referentnog etalona sile**

Sva umjeravanja su provedena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje koji raspolaže referentnim etalom sile prikazanim na slici 26, čije su osnovne tehničke karakteristike navedene u tablici 6.

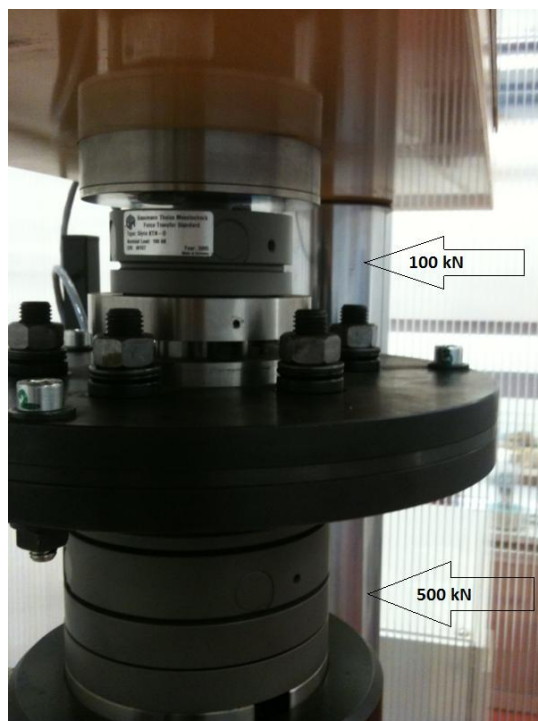


Slika 26. Referentni etalon sile u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva

Tablica 6. Karakteristike referentnog etalona sile

KARATERISTIKE REFERENTNOG ETALONA SILE	
Proizvođač	GTM, Njemačka
Mjerno područje	10 – 500 kN
Serijski broj	163
Nazivna sila	500 kN
Način opterećenja	Hidraulički
Smjer opterećenja	Vlak, tlak
Mjerni sustav	Mjerno pojačalo, dvostruki složeni dinamometri

Radi se o etalonu vrste KBNM – 500 kN, njemačkog proizvođača GTM (“Gassmann Theiss Messtechnik GmbH“). Nazivna vrijednost ovog etalona iznosi 500 kN te se njegovo mjerno područje kreće u rasponu od 10 do 500 kN. Referentni etalon posjeduje komparatorni mjerni sustav u obliku dvostruko složenih dinamometara (slika 27) koji čine deformacijska tijela koja se deformiraju pod djelovanjem opterećenja i čija deformacija prezentira vrijednost ostvarene sile.



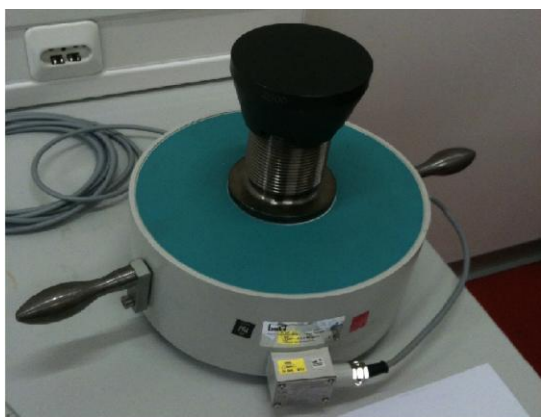
Slika 27. Dvostruko složeni dinamometri referentnog etalona sile

Takav mjerni sustav omogućuje ostvarivanje nesigurnosti mjerenja manjih ili jednakih od  $5 \times 10^{-4}$  te prema svojoj mornoj sposobnosti odgovara polužnom mehanizmu opterećivanja. Referentni

etalon se nalazi u strogo kontroliranim okolišnim uvjetima koji uključuju stalna mjerenja temperature, tlaka i vlage. Uređaj je postavljen na specijalno izvedenim antivibracijskim temeljima koji onemogućuju štetno djelovanje okolišnih vibracija.

### 7.3. Karakteristike posredničkog etalona sile

Umjeravani posrednički etalon se sastoji od dinamometra (slika 28) i mjernog pojačala s uređajem za očitavanje (slika 29). Radi se o električnom dinamometru tipa Z4A s tenzometarskim mjernim trakama njemačkog proizvođača Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) nazivne vrijednosti 500 kN koji je namijenjen opterećivanju na vlak odnosno tlak.



Slika 28. Dinamometar Z4A/500 kN



Slika 29. Mjerno pojačalo DMP40

Za potrebe pojačanja i registriranja mjernog signala korišteno je visoko precizno mjerno pojačalo vrste DMP40 proizvođača HBM. Ovo pojačalo pruža mogućnost odabira različitih parametara ispitivanja. Za umjeravanja koje slijede odabrani su slijedeći parametri:

- tip signala: bruto (abs-Apsolutno);
- mjerno područje: 2,5 mV/V;
- rezolucija: 0,000001;
- napona napajanja: 5 V;
- vrsta filtra 1: Bessel;
- vrsta filtra 2: Bessel;
- frekvencija filtra 1: 0,1 Hz;
- frekvencija filtra 2: 0,1 Hz.

#### 7.4. Rezultati umjeravanja i analiza rezultata

Rezultati umjeravanja posredničkog etalona sile pozicioniranog u centru detaljno su razrađeni u tekstu koji slijedi, a rezultati mjerenja provedenih izvan osi opterećenja navedeni su u prilogima I, II, III i IV.

Tablica 7 sadrži vrijednosti očitane kod predopterećenja za položaje dinamometra  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  i  $240^\circ$ . Ova predopterećenja do vrijednosti nazivne sile 500 kN provode se prije mjernih nizova umjeravanja. Kod svakog predopterećenja zabilježena je vrijednost na pokazivaču posredničkog etalona koja odgovara maksimalnoj sili te vrijednosti prije i nakon primjene sile.

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u centru

	$0^\circ$	$120^\circ$	$240^\circ$
Očitavanje prije primjene sile, mV/V	0,000000	0,000000	0,000000
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,998711	1,998836	1,998806
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,000010	-0,000009	-0,000019

U tablici 8 izneseni su rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500kN pozicioniranog u aksijalnoj osi opterećenja. U svakom mjernom nizu očitane su vrijednosti u deset mjernih točaka koje su redom iznosile 50 kN, 100 kN, 150 kN, 200 kN, 250 kN, 300 kN, 350 kN, 400 kN, 450 kN i 500 kN. Osim toga očitane su i vrijednosti prije primjene sile i nakon rasterećenja.

Tablica 8. Rezultati umjeravanja za dinamometar u centru

F, kN	Isti ugradbeni položaj $0^\circ$		Različiti ugradbeni položaji			
	$X_1$ , mV/V	$X_2$ , mV/V	$120^\circ$		$240^\circ$	
			$X_3$ , mV/V	$X_4'$ , mV/V	$X_5$ , mV/V	$X_6'$ , mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
50	0,199806	0,199807	0,199823	0,200118	0,199825	0,200135
100	0,399602	0,399609	0,399634	0,399998	0,399637	0,400020
150	0,599715	0,599728	0,599741	0,599884	0,599765	0,599909
200	0,799547	0,799568	0,799587	0,799740	0,799614	0,799748
250	0,999438	0,999455	0,999464	0,999672	0,999484	0,999685
300	1,199339	1,199355	1,199372	1,199536	1,199387	1,199555
350	1,399210	1,399230	1,399239	1,399397	1,399259	1,399406
400	1,599132	1,599151	1,599172	1,599285	1,599184	1,599283
450	1,798983	1,799002	1,799026	1,799088	1,799030	1,799093
500	1,998923	1,998939	1,998970	-	1,998977	-
0	-0,000013	0,000005	-	0,000031	-	0,000033

Tablica 9 sadrži srednje vrijednosti očitavanja za svih pet ugradbenih položaja.

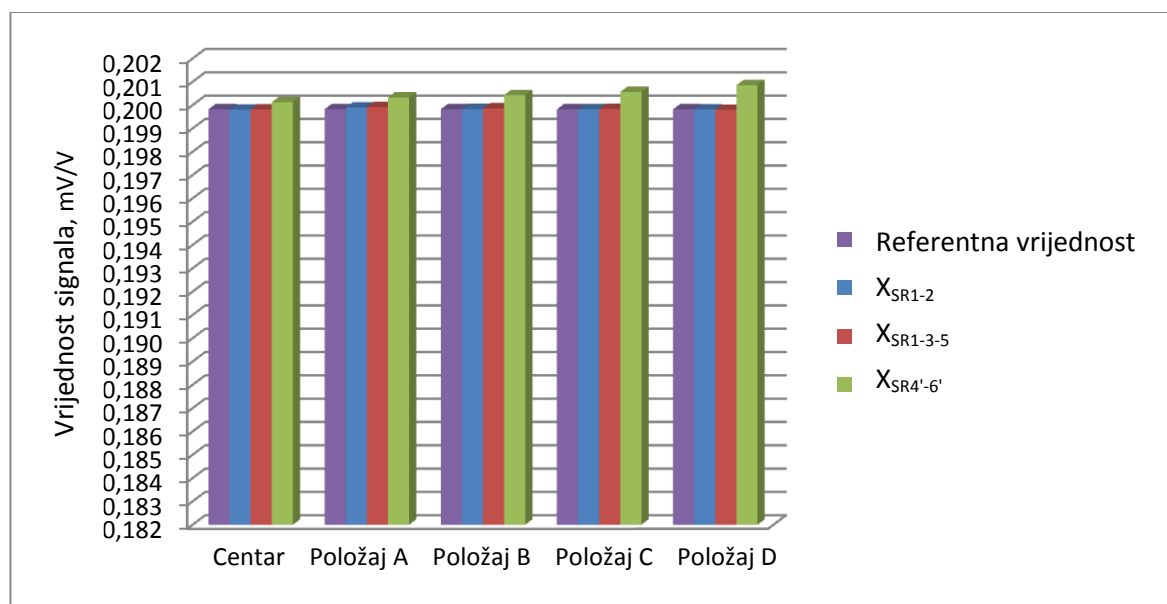
Tablica 9. Srednje vrijednosti mjernog signala pri rastućoj i padajućoj sili

Položaj dinamometra	F kN	Referentna vrijednost mV/V	$X_{SR1-2}$ mV/V	$X_{SR1-3-5}$ mV/V	$X_{SR4'-6'}$ mV/V
CENTAR	50	0,199823	0,199806	0,199818	0,200127
	100	0,399645	0,399605	0,399624	0,400009
	150	0,599468	0,599721	0,599741	0,599897
	200	0,799292	0,799557	0,799582	0,799744
	250	0,999121	0,999447	0,999462	0,999679
	300	1,198954	1,199347	1,199366	1,199545
	350	1,398794	1,399220	1,399236	1,399401
	400	1,598643	1,599141	1,599163	1,599284
	450	1,798502	1,798992	1,799013	1,799091
	500	1,998372	1,998931	1,998957	-
A	50	0,199823	0,199898	0,199913	0,200329
	100	0,399645	0,399819	0,399876	0,400142
	150	0,599468	0,599733	0,599758	0,599915
	200	0,799292	0,799514	0,799539	0,799694
	250	0,999121	0,999298	0,999323	0,999472
	300	1,198954	1,199064	1,199085	1,199226
	350	1,398794	1,398783	1,398792	1,398910
	400	1,598643	1,598469	1,598471	1,598560
	450	1,798502	1,798160	1,798153	1,798197
	500	1,998372	1,997838	1,997821	-
B	50	0,199823	0,199831	0,199861	0,200427
	100	0,399645	0,399795	0,399801	0,400295
	150	0,599468	0,600046	0,600000	0,600080
	200	0,799292	0,799794	0,799749	0,799844
	250	0,999121	0,999621	0,999594	0,999679
	300	1,198954	1,199359	1,199337	1,199427
	350	1,398794	1,399075	1,399059	1,399142
	400	1,598643	1,598827	1,598812	1,598876
	450	1,798502	1,798491	1,798478	1,798500
	500	1,998372	1,998188	1,998176	-
C	50	0,199823	0,199819	0,199836	0,200567
	100	0,399645	0,399852	0,399872	0,400455
	150	0,599468	0,600068	0,600135	0,600274
	200	0,799292	0,799826	0,799882	0,800039
	250	0,999121	0,999595	0,999644	0,999940
	300	1,198954	1,199097	1,199225	1,200349
	350	1,398794	1,398931	1,398792	1,400729
	400	1,598643	1,598829	1,598561	1,601121
	450	1,798502	1,798580	1,798170	1,801403
	500	1,998372	1,998259	1,997734	-
D	50	0,199823	0,199818	0,199797	0,200855
	100	0,399645	0,400188	0,400036	0,400549
	150	0,599468	0,599479	0,599623	0,601721
	200	0,799292	0,797817	0,798091	0,803762
	250	0,999121	0,996409	0,996601	1,005549
	300	1,198954	1,195137	1,195242	1,207058
	350	1,398794	1,393938	1,393908	1,408431
	400	1,598643	1,592637	1,592465	1,609511
	450	1,798502	1,791197	1,790913	1,809432
	500	1,998372	1,989839	1,989440	-

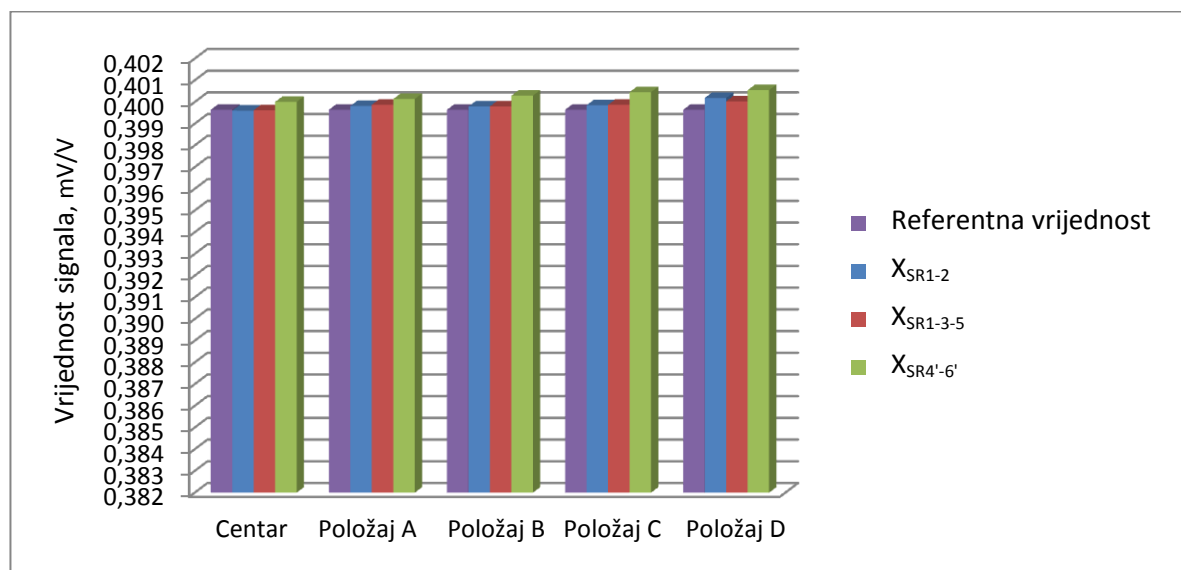
Radi se o srednjim vrijednostima signala za rastuće nizove i to pri istom odnosno različitim ugradbenim položajima ( $X_{SR1-2}$ ,  $X_{SR1-3-5}$ ) te o srednjoj vrijednosti za padajuće nizove 4' i 6' ( $X_{SR4'-6'}$ ).

6). Ove su vrijednosti izračunate za svaku mjernu točku i položaj dinamometra: centar, A, B, C i D. Osim toga navedene su i referentne vrijednosti za svaku umjeravanu silu koje su dobivene umjeravanjem posredničkog etalona u PTB-u.

Na slikama 30 do 39 prikazane su za svaku mjernu točku srednje vrijednosti signala  $X_{SR1-2}$ ,  $X_{SR1-3-5}$ ,  $X_{SR4'-6'}$  zajedno s referentnim vrijednostima pri različitim ugradbenim položajima.

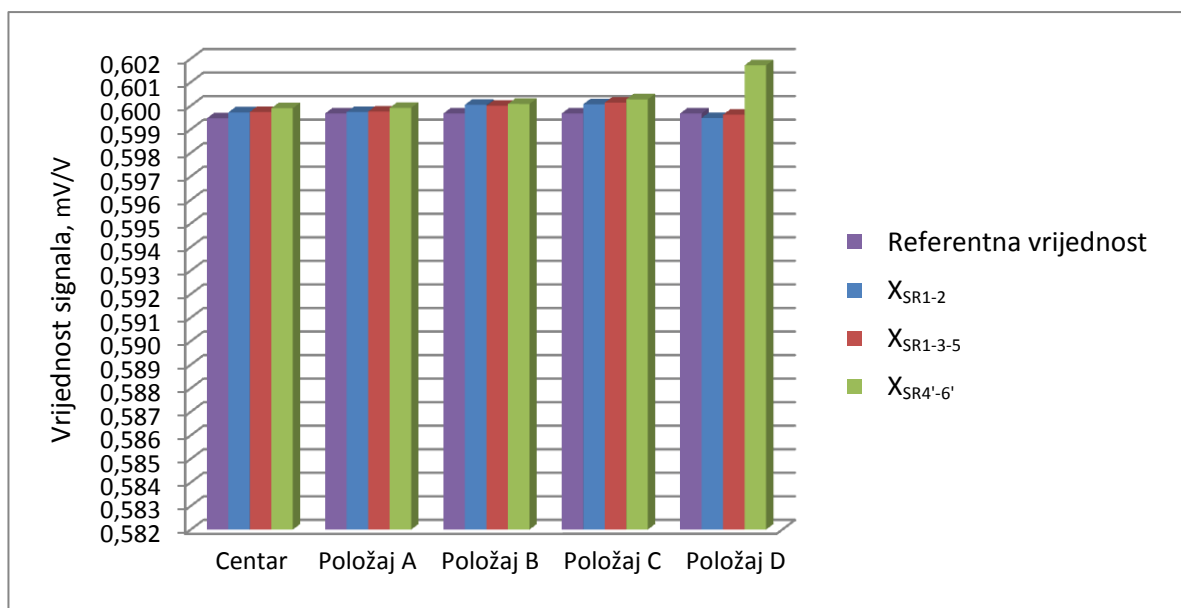


Slika 30. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 50 kN

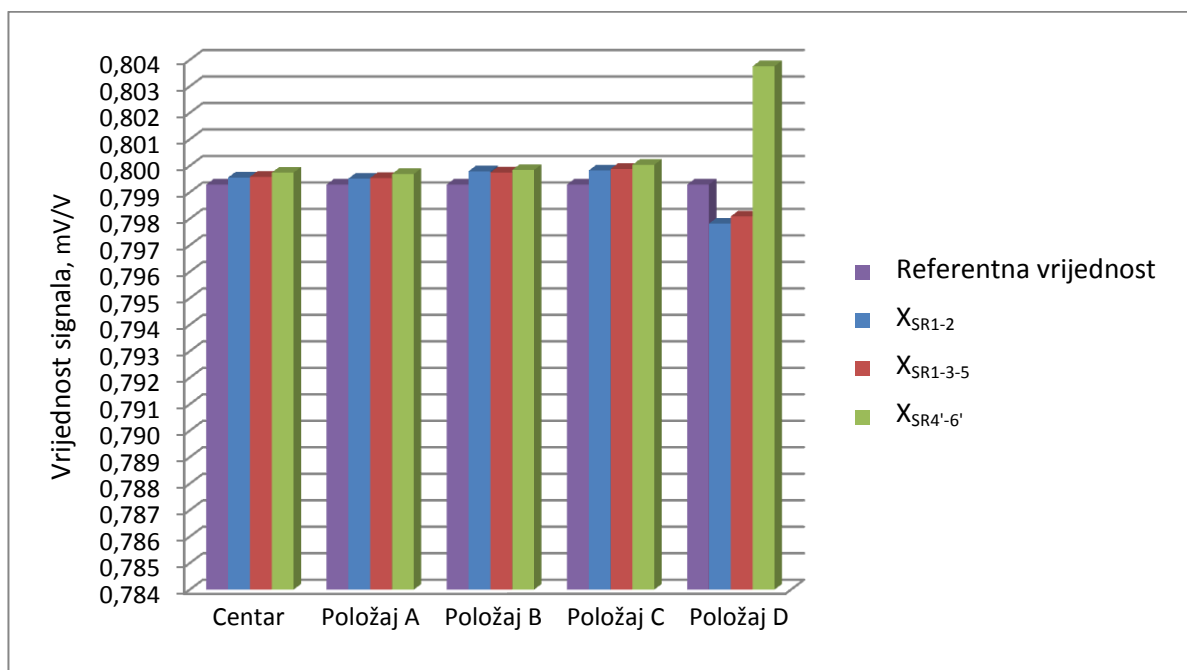


Slika 31. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 100 kN

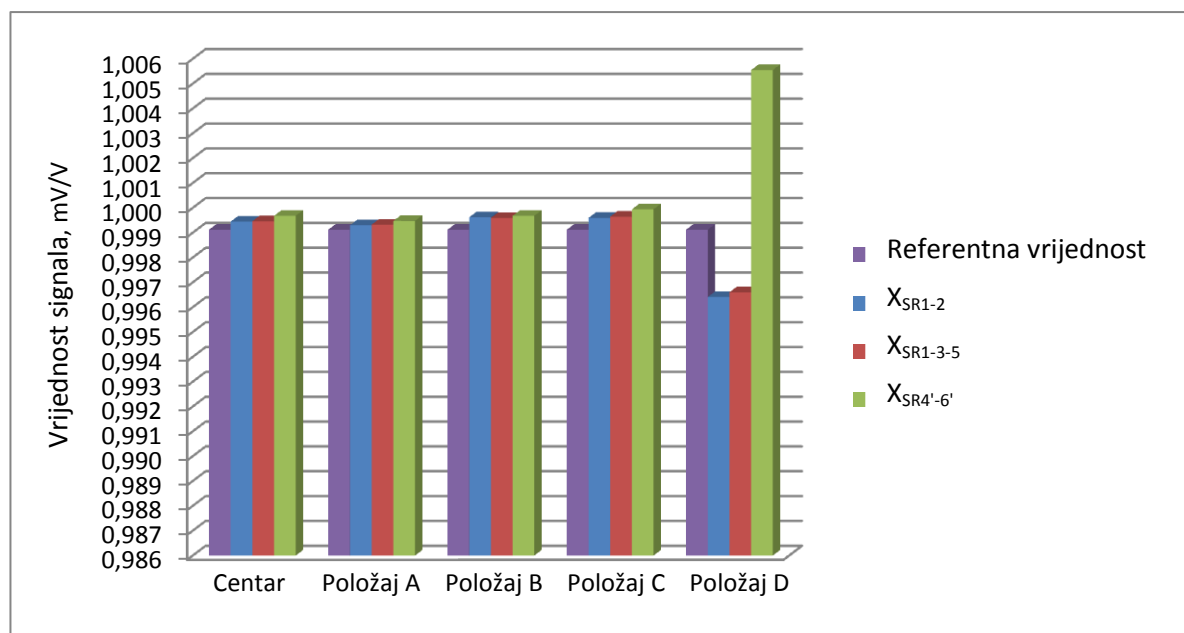




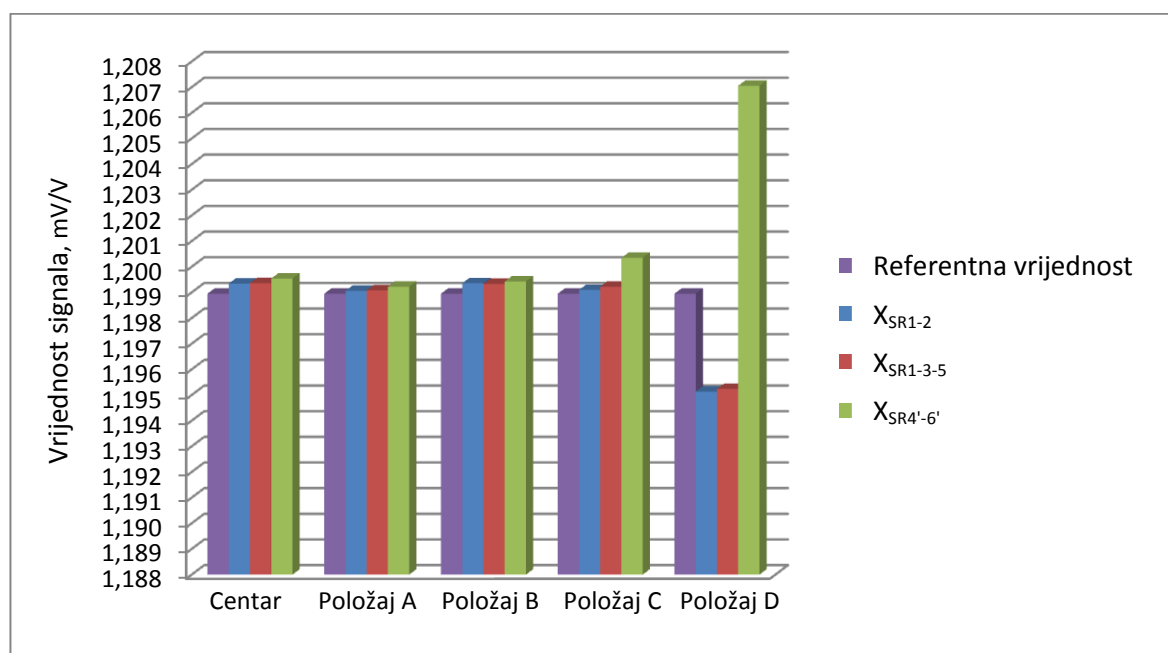
Slika 32. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 150 kN



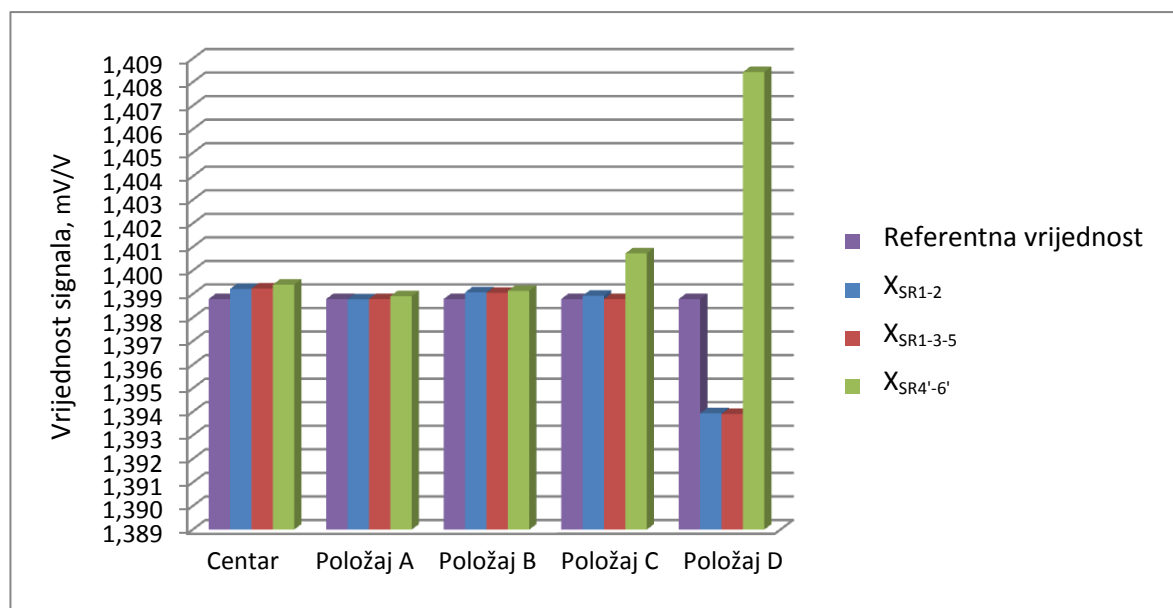
Slika 33. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 200 kN



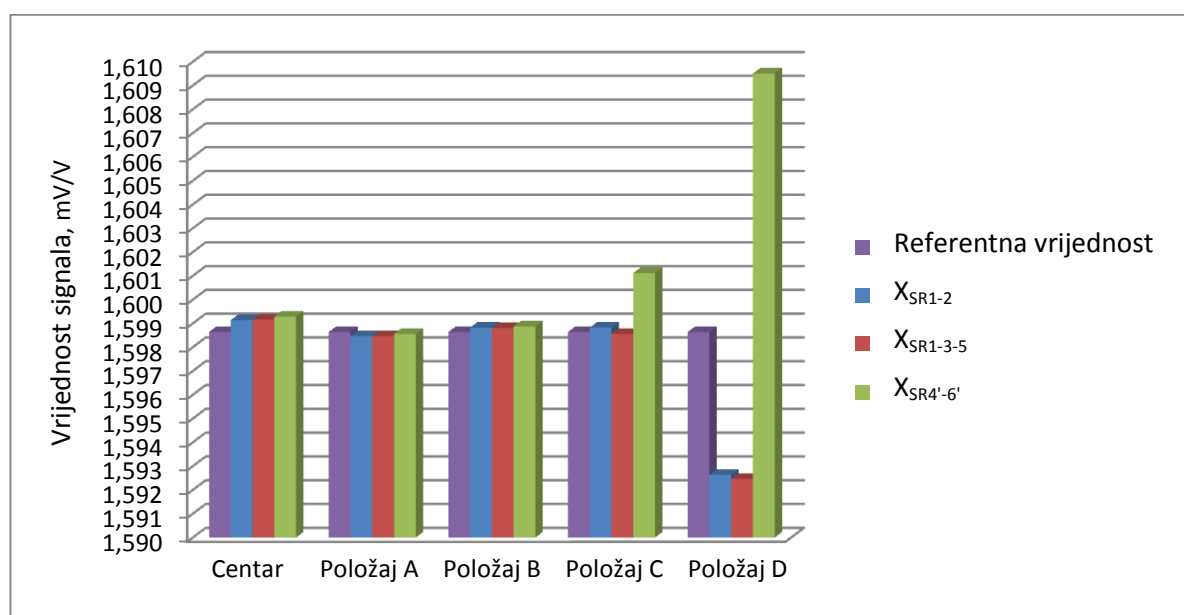
Slika 34. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 250 kN



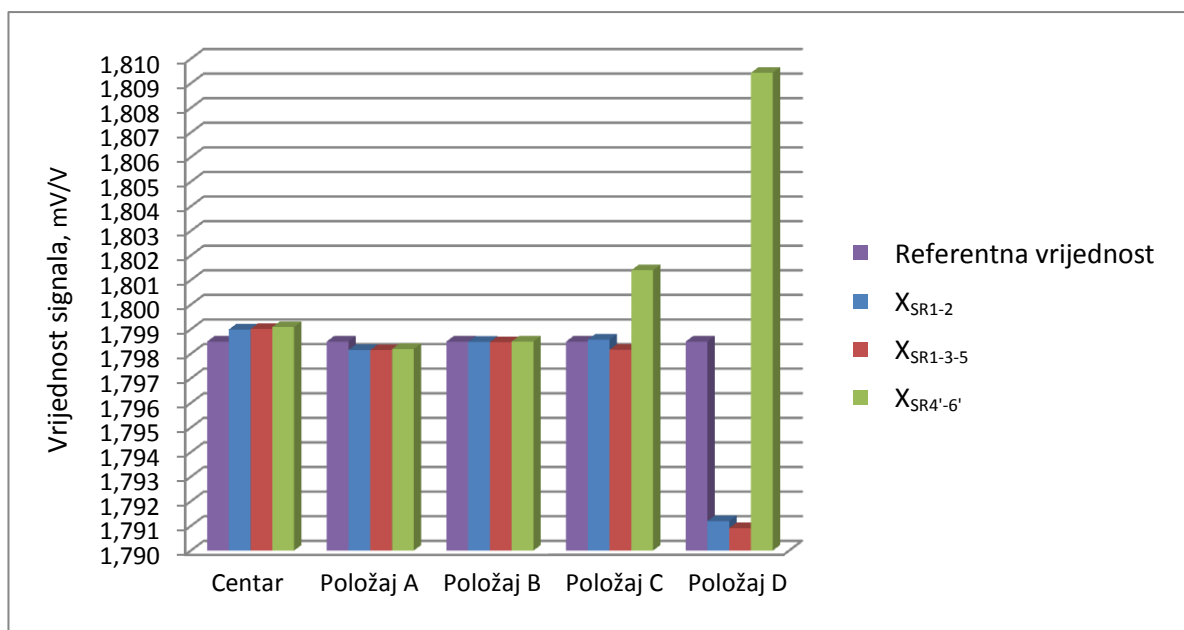
Slika 35. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 300 kN



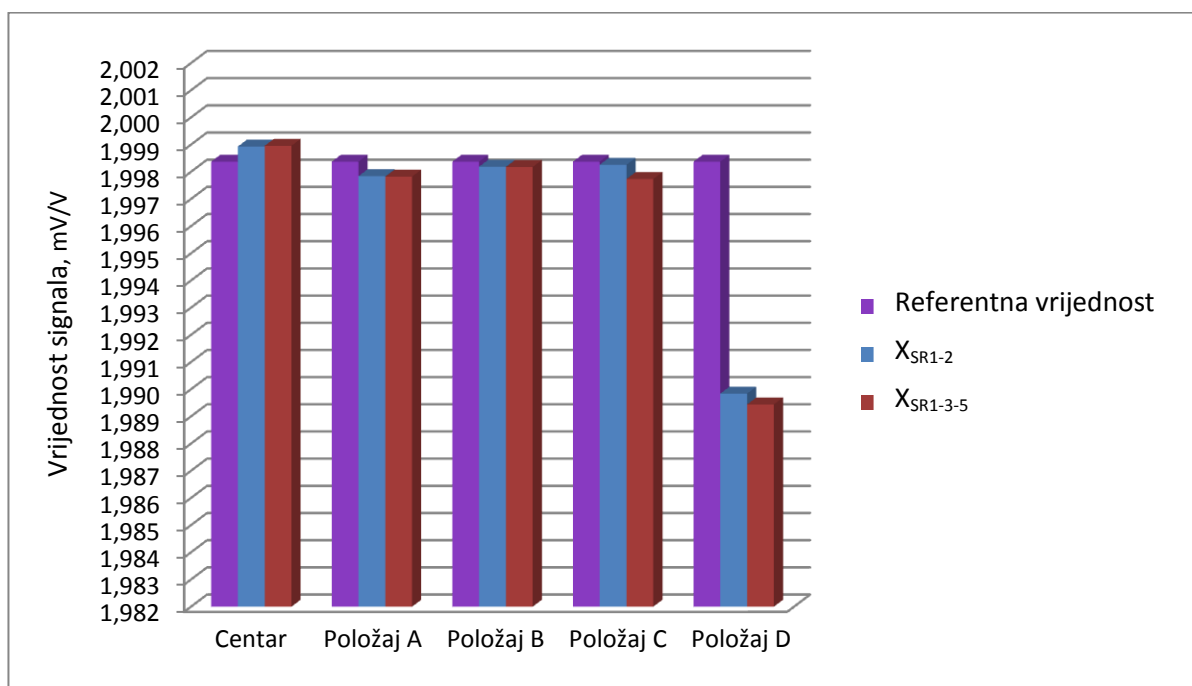
Slika 36. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 350 kN



Slika 37. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 400 kN



Slika 38. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 450 kN



Slika 39. Vrijednosti mjernog signala za različite položaje dinamometra, mjerna točka 500 kN

Iz dijagrama na slici 30 je vidljivo da se vrijednost mjernog signala izmjenog pri rastućoj ispitnoj sili u nizovima sa i bez rotacije, podudara s referentnom vrijednošću za sve ispitivane položaje dinamometra. Što se tiče signala za padajuće nizove on je u svim položajima veći od tražene referentne vrijednosti. Pri višim mjernim točkama situacija je slična kada se radi o poziciji centar, A odnosno B. Međutim kod položaja C i D dolazi do stanovitih odstupanja. Naime, za položaj C je uočljivo da vrijednost izlaznog signala izmjenog pri padajućoj sili na

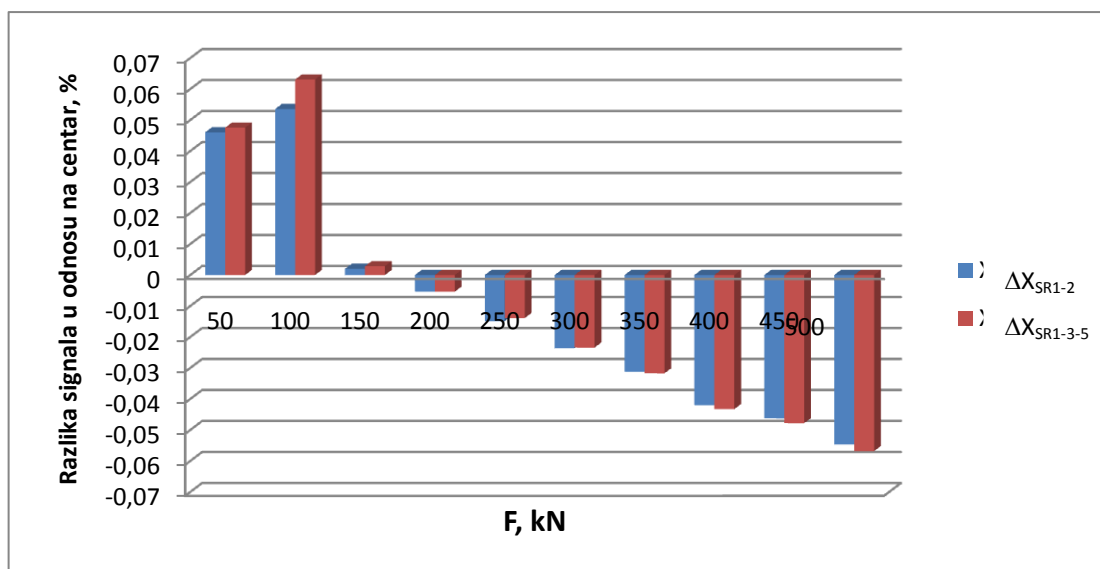
mjernim točkama 300 kN, 350 kN, 400 kN i 450 kN (slike 35 do 38) raste u odnosu na ostale vrijednosti. Osobito je to izraženo pri višim ispitnim silama. Kod položaja D mjerni signal u nizovima sa i bez rotacije izmjeren pri sili 200 kN i višoj postepeno opada u odnosu na njegove vrijednosti za ostale položaje (slike 33 do 39). Također je vidljivo smanjenje signala  $X_{SR1-2}$  i  $X_{SR1-3-5}$  i s obzirom na referentne vrijednosti. Ove razlike postaju sve signifikantnije kako se sila približava nazivnoj vrijednosti 500 kN. Ako se razmatra vrijednost signala u položaju D za padajuće nizove jasno se može zamijetiti da porastom ispitne sile njegova vrijednost nadmašuje referentni signal, a osobito vrijednosti izmjerene u rastućim nizovima.

U tablici 10 prikazane su razlike srednjih vrijednosti mjernog signala za rastuće nizove sila sa i bez rotacije ( $\Delta X_{SR1-3-5}$ ,  $\Delta X_{SR1-2}$ ) u odnosu na centar.

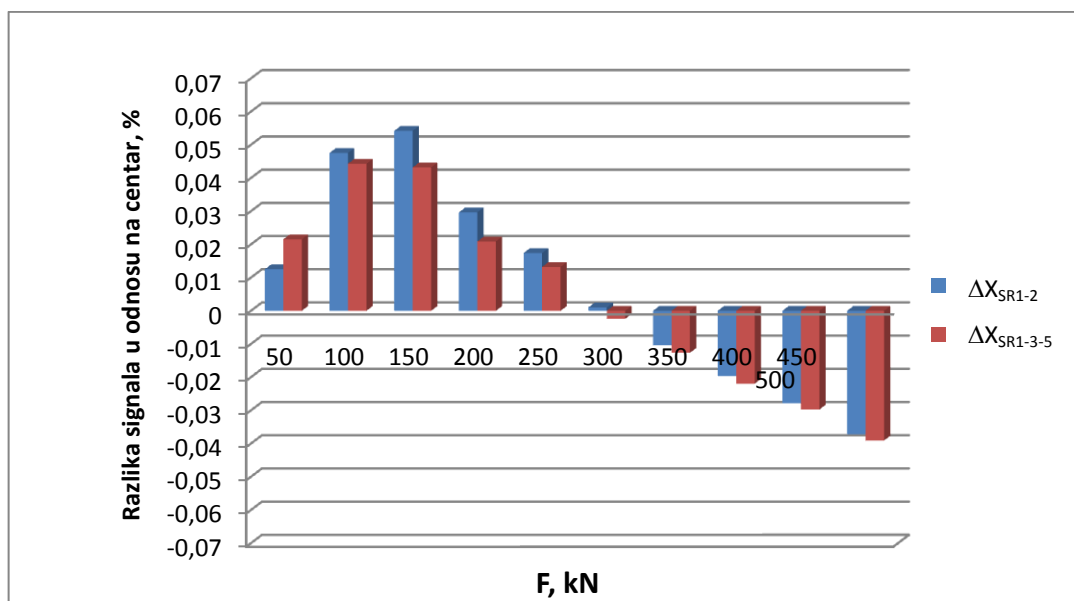
Tablica 10. Razlike srednjih vrijednosti signala u odnosu na centar  
za rastuće nizove sa i bez rotacije

Položaj	F, kN	$\Delta X_{SR1-2}$ , %	$\Delta X_{SR1-3-5}$ , %	Položaj	F, kN	$\Delta X_{SR1-2}$ , %	$\Delta X_{SR1-3-5}$ , %
A	50	0,0460	0,0475	C	50	0,0065	0,0090
	100	0,0536	0,0631		100	0,0618	0,0621
	150	0,0020	0,0028		150	0,0579	0,0657
	200	-0,0054	-0,0054		200	0,0336	0,0375
	250	-0,0149	-0,0139		250	0,0148	0,0182
	300	-0,0236	-0,0234		300	-0,0208	-0,0118
	350	-0,0312	-0,0317		350	-0,0207	-0,0317
	400	-0,0420	-0,0433		400	-0,0195	-0,0376
	450	-0,0463	-0,0478		450	-0,0229	-0,0469
	500	-0,0547	-0,0568		500	-0,0336	-0,0612
B	50	0,0125	0,0215	D	50	0,0060	-0,0105
	100	0,0475	0,0443		100	0,1459	0,1031
	150	0,0542	0,0432		150	-0,0404	-0,0197
	200	0,0296	0,0209		200	-0,2176	-0,1865
	250	0,0174	0,0132		250	-0,3040	-0,2863
	300	0,0010	-0,0024		300	-0,3510	-0,3438
	350	-0,0104	-0,0126		350	-0,3775	-0,3808
	400	-0,0196	-0,0219		400	-0,4067	-0,4188
	450	-0,0279	-0,0297		450	-0,4333	-0,4502
	500	-0,0372	-0,0391		500	-0,4548	-0,4761

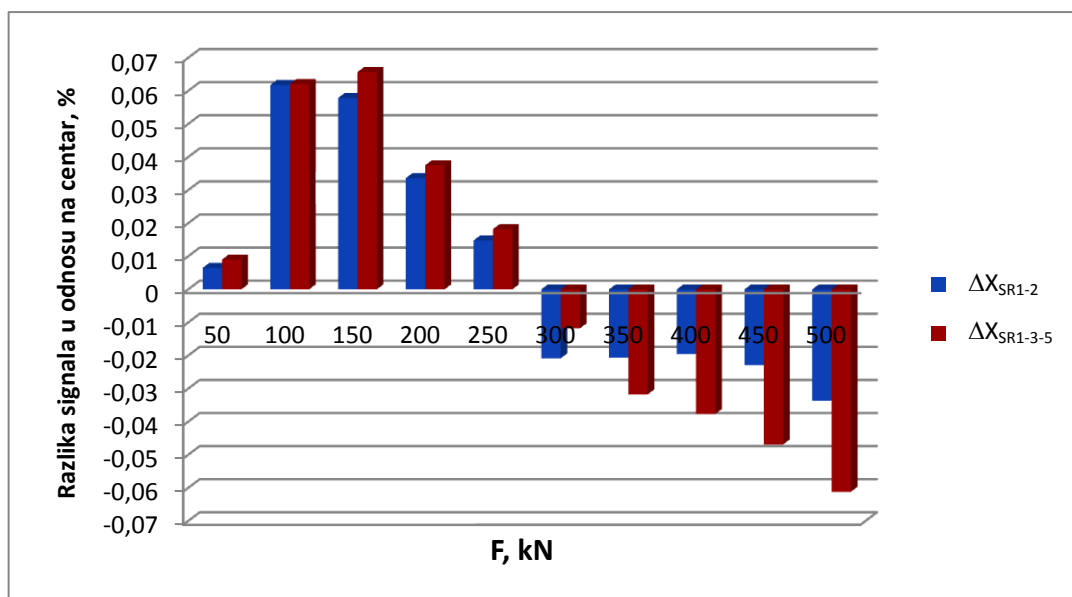
Ovo je i grafički prikazano na slikama 40, 41, 42 i 43 koje se redom odnose na pozicije A, B, C i D.



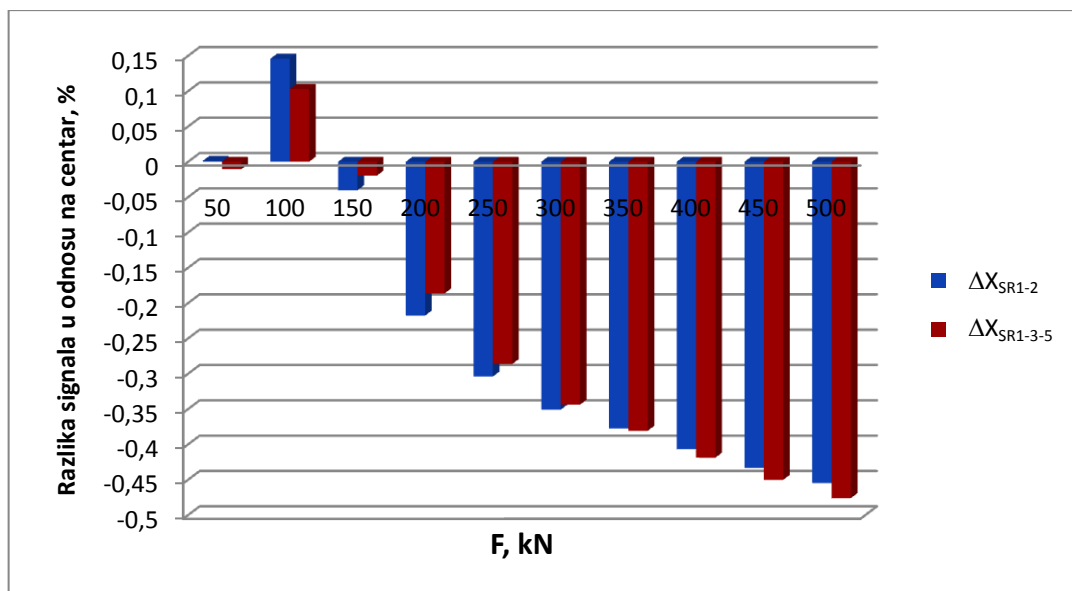
Slika 40. Razlika signala na položaju A i centru za rastuće nizove sa i bez rotacije



Slika 41. Razlika signala na položaju B i centru za rastuće nizove sa i bez rotacije



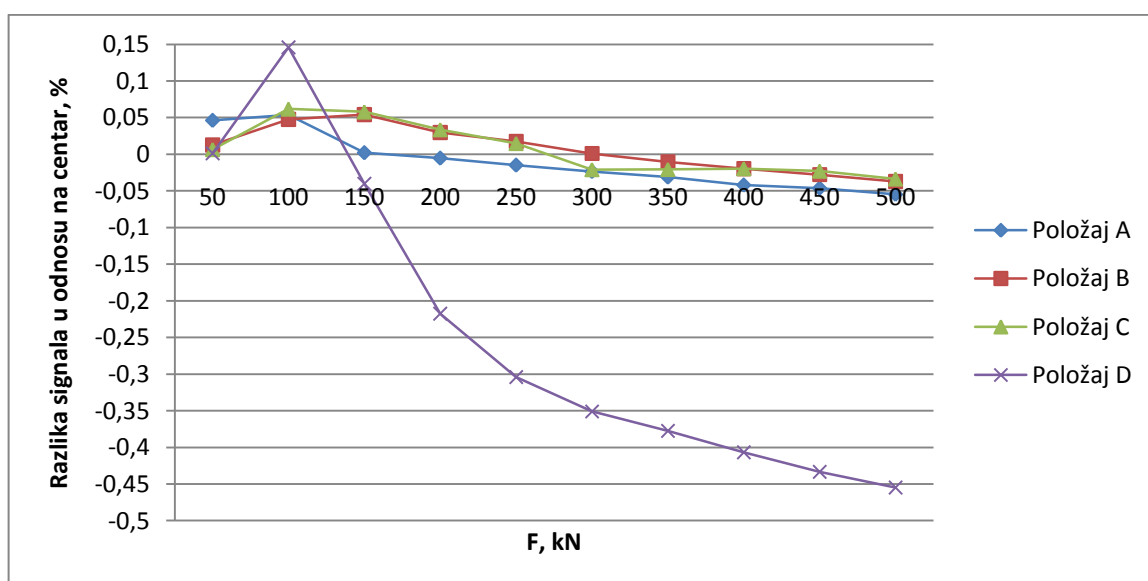
Slika 42. Razlika signala na položaju C i centru za rastuće nizove sa i bez rotacije



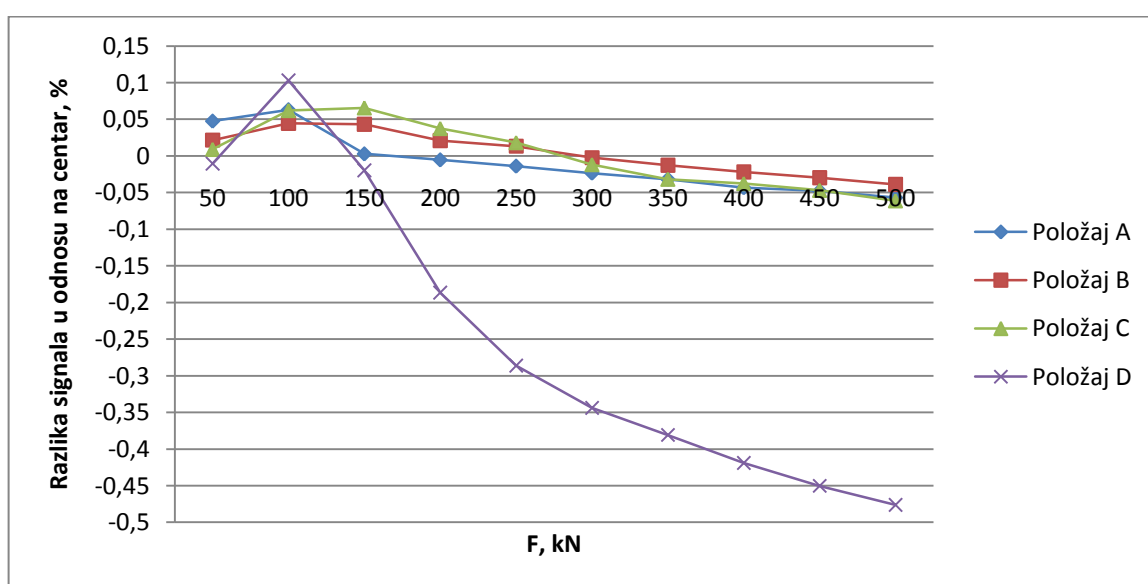
Slika 43. Razlika signala na položaju D i centru za rastuće nizove sa i bez rotacije

Iz dijagrama na slici 40 koji opisuje razlike između veličina signala na položaju A i centru jasno proizlazi da su odstupanja na prve dvije točke 50 kN i 100 kN relativno velika, dok već na idućoj mjernoj točki 150 kN naglo padaju na nulu da bi daljnjim porastom sile kontinuirano rasla s negativnom predznakom. Sličan trend može se primijetiti usporede li se vrijednosti za položaj D i centru (slika 43). Međutim, ovdje treba napomenuti da se radi o značajno većim iznosima odstupanja. Ako se napravi usporedba signala između položaj B i centra, odnosno položaja C i centra (slike 41 i 42) slijedi gotovo istovjetna tendencija promjene po mjernim točkama unutar ispitivanog područja. Za ove položaje odstupanja u odnosu na centar su pozitivna do vrijednosti

sile 300 kN, a nakon toga vrijednosti signala na položaju B i C manje su nego u centru tako da je zabilježena negativna razlika koja u postotnom iznosu raste kako se približava zadnja mjerna točka 500 kN. Što se tiče razlike zabilježene za nizove bez rotacije ( $\Delta X_{SR1-2}$ ) i one sa rotacijom ( $\Delta X_{SR1-3-5}$ ) evidentno je da su za sve položaje dinamometra, osim pozicije C, odstupanja gotovo identična i to na svim mjernim točkama. Jedino su za položaj C zabilježene nešto veće razlike ovisno o tome promatra li se isti ili različit ugradbeni položaj. Ovdje su vrijednosti odstupanja koje karakteriziraju rastuće nizove sa rotacijom nešto veće od onih za isti ugradbeni položaj. Na slici 44 prikazana je razlika  $\Delta X_{SR1-2}$  za sva četiri položaja A, B, C i D. Razlika  $\Delta X_{SR1-3-5}$  za nizove s rotacijom i sva četiri ispitna položaja predložena je slikom 45.



Slika 44. Razlika signala u odnosu na centar za sva četiri položaja, rastući nizovi bez rotacije



Slika 45. Razlika signala u odnosu na centar za sva četiri položaja, rastući nizovi sa rotacijom

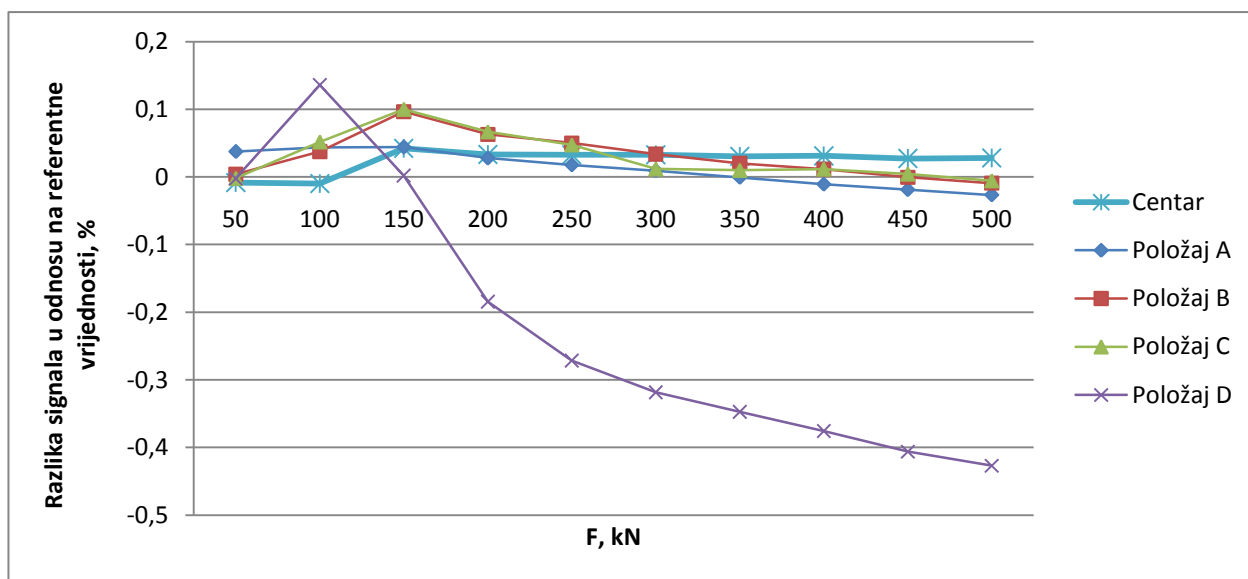


Neovisno o tome radi li se o istom ili različitom ugradbenom položaju dobivene funkcijske ovisnosti na ovim dijagramima skoro su identične. Za položaje A, B i C je karakteristično da su odstupanja signala u odnosu na centar vrlo mala i kreću se u rasponu od -0,061% do 0,066%. Pri nižim mjernim točkama odstupanja su pozitivna, a pri višim postaju negativna. Ono što je posebno potrebno istaknuti jest krivulja za položaj D gdje su zabilježene puno veće razlike signala s obzirom na centar nego što je to slučaj za ostale položaje. Kako porastom sile razlika između vrijednosti signala izmjerenog na položaju D i centru postaje sve veća maksimalno odstupanje u iznosu od -0,476% zabilježeno je na zadnjoj mjernoj točki.

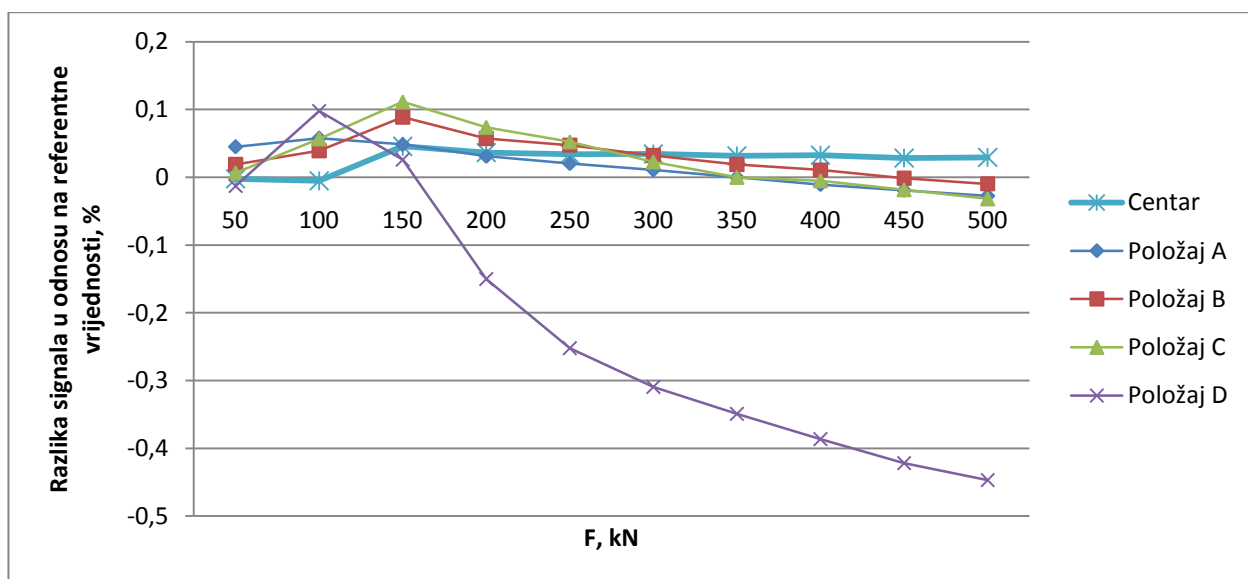
Vrijednosti signala izmjerenog pri rastućoj ispitnoj sili mogu se komparirati i sa referentnim vrijednostima što je navedeno u tablici 11 i prikazano slikama 46 i 47.

Tablica 11. Razlike srednjih vrijednosti signala u odnosu na referentne vrijednosti  
za rastuće nizove sa i bez rotacije

Položaj	F, kN	$\Delta X_{SR1-2}, \%$	$\Delta X_{SR1-3-5}, \%$	Položaj	F, kN	$\Delta X_{SR1-2}, \%$	$\Delta X_{SR1-3-5}, \%$
Centar	50	-0,0085	-0,0025	C	50	-0,0020	0,0065
	100	-0,0100	-0,0053		100	0,0518	0,0568
	150	0,0422	0,0455		150	0,1001	0,1113
	200	0,0332	0,0363		200	0,0668	0,0738
	250	0,0326	0,0341		250	0,0474	0,0523
	300	0,0328	0,0344		300	0,0119	0,0226
	350	0,0305	0,0316		350	0,0098	-0,0001
	400	0,0312	0,0325		400	0,0116	-0,0051
	450	0,0272	0,0284		450	0,0043	-0,0185
	500	0,0280	0,0292		500	-0,0057	-0,0319
A	50	0,0375	0,0450	D	50	-0,0025	-0,0130
	100	0,0435	0,0578		100	0,1359	0,0978
	150	0,0442	0,0484		150	0,0018	0,0259
	200	0,0278	0,0309		200	-0,1845	-0,1503
	250	0,0177	0,0202		250	-0,2714	-0,2522
	300	0,0092	0,0109		300	-0,3184	-0,3096
	350	-0,0008	-0,0001		350	-0,3472	-0,3493
	400	-0,0109	-0,0108		400	-0,3757	-0,3865
	450	-0,0190	-0,0194		450	-0,4062	-0,4220
	500	-0,0267	-0,0276		500	-0,4270	-0,4470
B	50	0,0040	0,0190				
	100	0,0375	0,0390				
	150	0,0964	0,0887				
	200	0,0628	0,0572				
	250	0,0501	0,0473				
	300	0,0338	0,0319				
	350	0,0201	0,0189				
	400	0,0115	0,0106				
	450	-0,0006	-0,0013				
	500	-0,0092	-0,0098				



Slika 46. Razlika signala u odnosu na referentne vrijednosti  
za svih pet ispitnih položaja i rastuće nizove bez rotacije



Slika 47. Razlika signala u odnosu na referentne vrijednosti  
za svih pet ispitnih položaja i rastuće nizove sa rotacijom

Prikazi na dijagramima 46 i 47 nalikuju onima na slikama 44 i 45 samo što su krivulje pomaknute prema gore ovisno o tome koliko očitavanja u centru odstupaju od referentnih vrijednosti. Krivulja koja opisuje rezultate za centar jasno pokazuje da su vrijednosti odstupanja zabilježene pri sili 100 kN i većoj skoro konstantne. Pri nižim silama (50 kN, 100 kN) srednje vrijednosti signala izmjerene u centru pri rastućoj ispitnoj sili gotovo su jednake referentnim vrijednostima tako da su odstupanja na prve dvije točke praktički jednaka nuli. Najlošiji rezultati zabilježeni su ponovo za položaj D gdje, neovisno o tome razmatraju li se nizovi sa ili bez

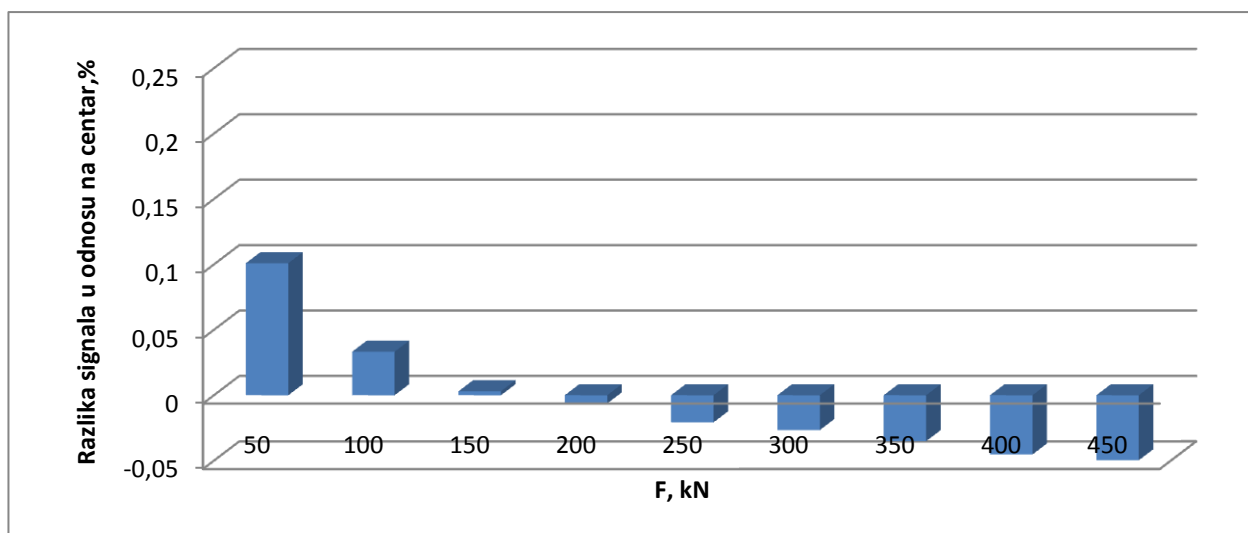
rotacije, odstupanja u odnosu na vrijednosti referentnog signala rastu povećanjem ispitne sile. Doduše iznos ovih odstupanja po mjernim točkama je nešto manji nego ako se gledaju odstupanja prema vrijednostima signala u centru što je uvjetovano činjenicom da su očitavanja za centar veća od referentnih pa je njihova relativna razlika pozitivna dok su odstupanja između vrijednosti signala na položaju D i referentnih vrijednosti negativnog predznaka pa se ona djelomično poništavaju.

Razmatranja slična onima za rastuće nizove mogu se primijeniti i u slučaju padajućih nizova. Stoga su u tablici 12 dane razlike između srednjih vrijednosti signala pri padajućoj ispitnoj sili za položaje A, B, C, D u odnosu na centar.

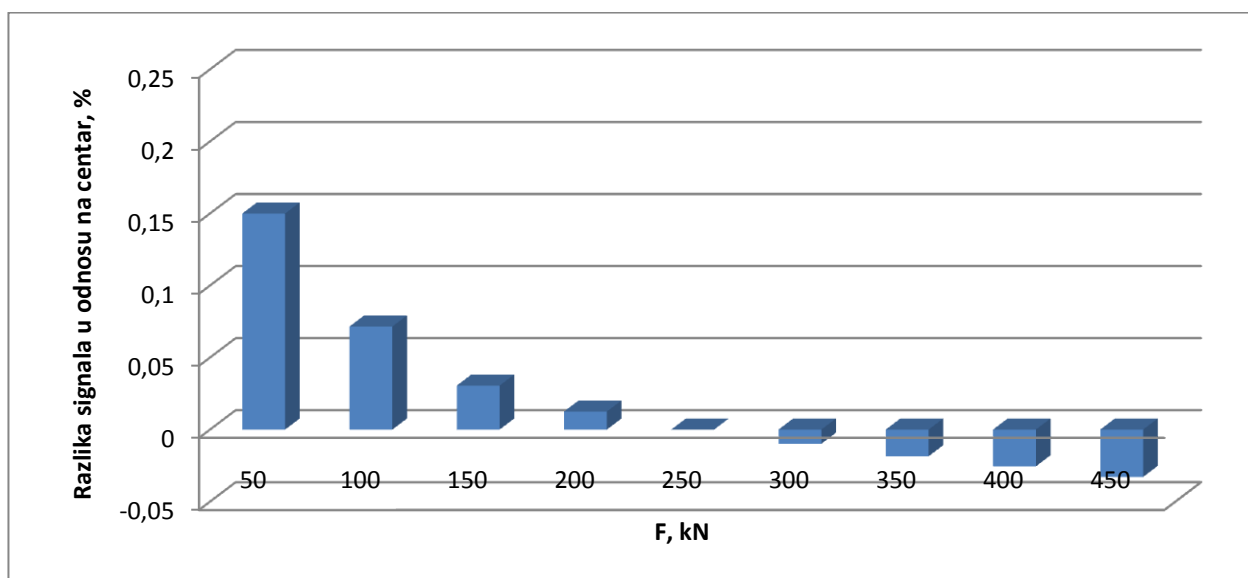
Tablica 12. Razlike srednjih vrijednosti signala u odnosu na centar za padajuće nizove

Položaj	F, kN	$\Delta X_{SR4'-6'}$ , %	Položaj	F, kN	$\Delta X_{SR4'-6'}$ , %
A	50	0,1009	C	50	0,2199
	100	0,0333		100	0,1115
	150	0,0030		150	0,0628
	200	-0,0063		200	0,0369
	250	-0,0207		250	0,0261
	300	-0,0266		300	0,0670
	350	-0,0351		350	0,0949
	400	-0,0453		400	0,1149
	450	-0,0497		450	0,1285
B	50	0,1500	D	50	0,3638
	100	0,0715		100	0,1350
	150	0,0305		150	0,3041
	200	0,0125		200	0,5024
	250	0,0000		250	0,5872
	300	-0,0098		300	0,6263
	350	-0,0185		350	0,6453
	400	-0,0255		400	0,6395
	450	-0,0329		450	0,5748

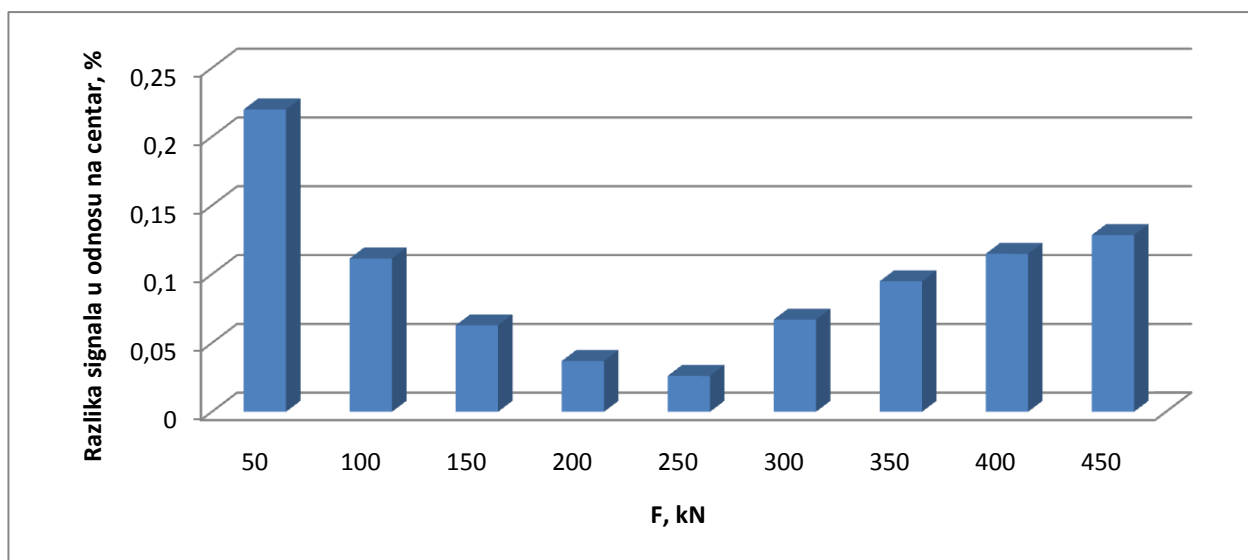
Na slikama 48, 49, 50, 51 dan je grafički prikaz odstupanja za svaki ugradbeni položaj.



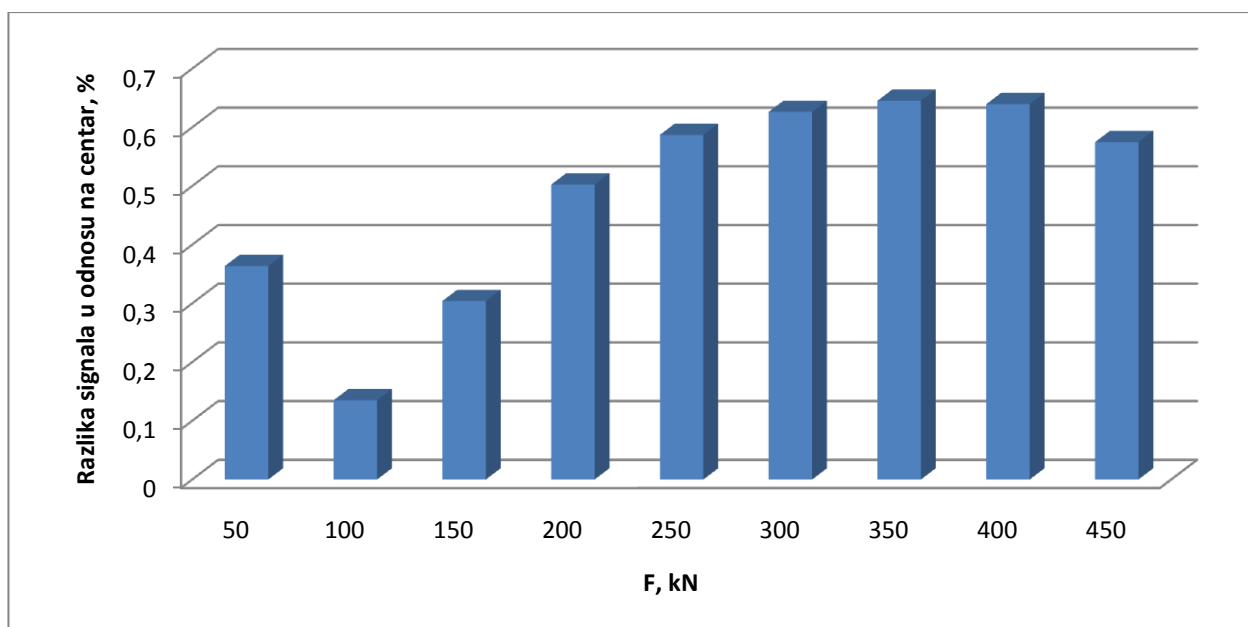
Slika 48. Razlika signala na položaju A i centru za padajuće nizove



Slika 49. Razlika signala na položaju B i centru za padajuće nizove



Slika 50. Razlika signala na položaju C i centru za padajuće nizove

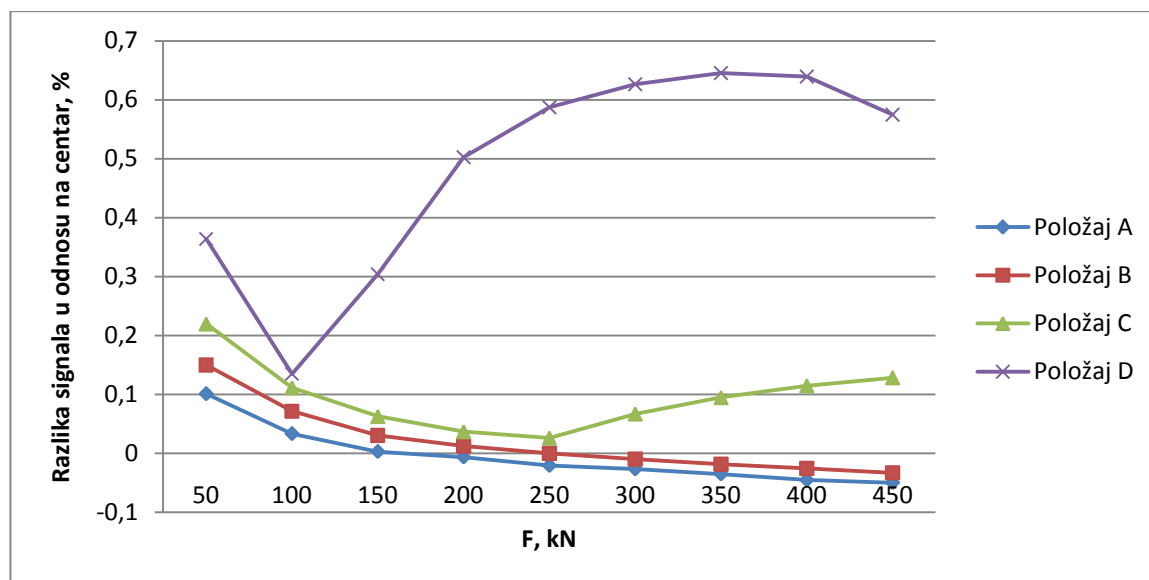


Slika 51. Razlika signala na položaju D i centru za padajuće nizove

Prikazi na slikama 48 i 49 jasno pokazuju gotovo istovjetnu zakonitost promjene kada se radi položaju A i položaju B. Za ove položaje razlika signala u odnosu na centar najveća je na prvoj mjernoj točki 50 kN i zatim se smanjuje u postotnom iznosu da bi pri vrijednosti sile oko 250 kN ona postala negativna te rasla prema kraju mjernog područja. Odstupanja signala u položaju C i centru nešto su drugačija (slika 50). Premda ona također padaju do vrijednosti sile 250 kN nakon toga ponovo rastu, ali ne više u negativnom već pozitivnom smjeru. Potrebno je istaknuti da su za ovaj položaj odstupanja po mjernim točkama nešto većeg iznosa nego što je to bilo za položaje A i B. Osobito velika odstupanja zabilježena su u poziciji D kada postotna razlika

između vrijednosti signala na ovom položaju i centru konstantno raste između točaka 100 kN i 350 kN (slika 51).

Odstupanja u odnosu na centar, zabilježena u padajućim nizovima, mogu se prikazati za sva četiri položaja kao što je to učinjeno na slici 52.



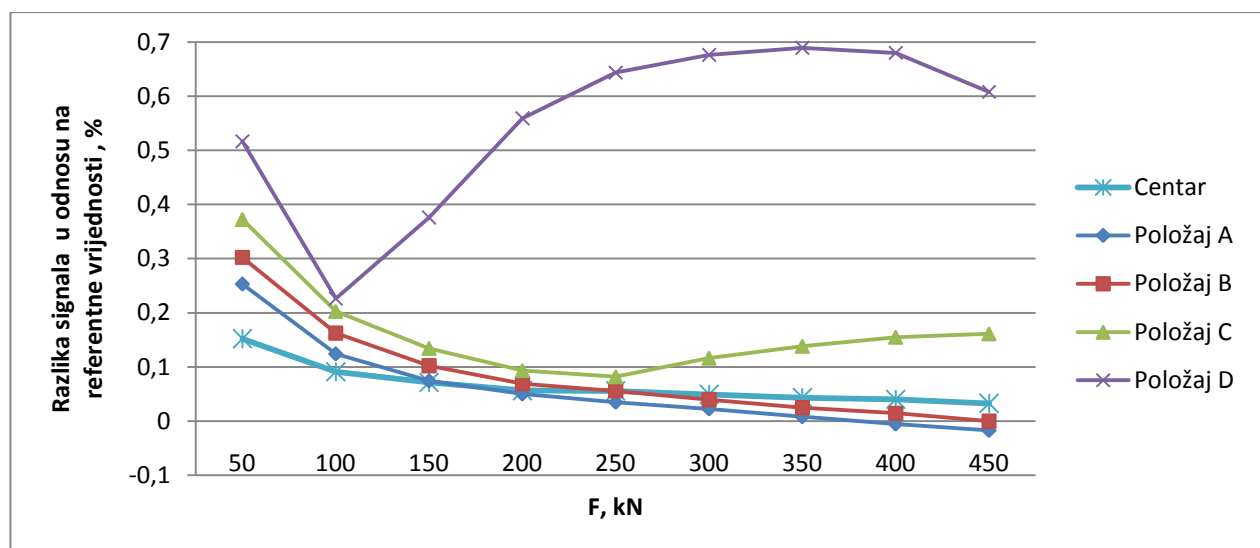
Slika 52. Razlika signala u odnosu na centar za sva četiri položaja, padajući nizovi

Može se uočiti da su za položaje A i B odstupanja pri određenim ispitnim silama slična onima pri rastućoj sili te se kreću u rasponu od 0,15% pri nižim točkama do -0,05% pri višim točkama. Kod položaja C zakonitost promjene se mijenja jer nakon 250 kN postotna razlika ponovo raste da bi na zadnjoj mjernoj točki 450 kN iznosila 0,13%. Najveća odstupanja s obzirom na centar zabilježena su za položaj D kao što je to bio slučaj i kod rastuće ispitne sile samo što se više ne radi o negativnim već pozitivnim vrijednostima.

Vrlo sličan dijagram slijedi usporede li se vrijednosti očitane pri padajućoj ispitnoj sili s referentnim vrijednostima koje su određene umjeravanjem u PTB-u. U tablici 13 navedene su vrijednosti odstupanja po mjernim točkama za svih pet ispitnih položaja (centar, A, B, C, D), a njihov grafički prikaz dan je na slici 53. Usporede li se prikazi na slikama 52 i 53 očito je da su oni vrlo slični osim što su krivulje pomaknute prema gore za vrijednost odstupanja signala u centru prema referentnom. Krivulja za centar jasno pokazuje da su razlike signala s obzirom na referentnu vrijednost skoro konstantne, izuzev prve tri točke.

Tablica 13. Razlike srednjih vrijednosti signala u odnosu na referentne vrijednosti za padajuće nizove

Položaj	F, kN	$\Delta X_{SR4'-6'}$ , %	Položaj	F, kN	$\Delta X_{SR4'-6'}$ , %
Centar	50	0,1521	C	50	0,3728
	100	0,0911		100	0,2029
	150	0,0716		150	0,1345
	200	0,0566		200	0,0935
	250	0,0558		250	0,0820
	300	0,0493		300	0,1164
	350	0,0434		350	0,1383
	400	0,0401		400	0,1551
	450	0,0327		450	0,1613
A	50	0,2532	D	50	0,5165
	100	0,1246		100	0,2265
	150	0,0746		150	0,3758
	200	0,0503		200	0,5592
	250	0,0351		250	0,6434
	300	0,0227		300	0,6760
	350	0,0083		350	0,6890
	400	-0,0052		400	0,6798
	450	-0,0170		450	0,6077
B	50	0,3023			
	100	0,1626			
	150	0,1021			
	200	0,0691			
	250	0,0558			
	300	0,0395			
	350	0,0249			
	400	0,0146			
	450	-0,0001			



Slika 53. Razlika signala u odnosu na referentne vrijednosti za svih pet ispitnih položaja, padajući nizovi

Osim analize mjernog signala po mjernim točkama za različite položaje dinamometra interesantno je vidjeti kako veličina signala utječe na karakteristične pogreške posredničkog etalona. Radi se o sljedećim pogreškama:

- relativna pogreška obnovljivosti bez rotacije ( $b$ );
- relativna pogreška ponovljivosti sa rotacijom ( $b'$ );
- relativno interpolacijsko odstupanje ( $f_c$ );
- relativno odstupanje nul vrijednosti ( $f_o$ );
- relativna pogreška histereze ( $v$ ).

Vrijednosti ovih pogrešaka izračunate su prema sljedećim izrazima:

- relativna pogreška obnovljivosti sa rotacijom ( $b$ ):

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\bar{X}_r} \right| \times 100$$

gdje je:

$X_{\max}$  - maksimalna vrijednost izmjerena u nizovima 1, 3 i 5,

$X_{\min}$  - minimalna vrijednost izmjerena u nizovima 1, 3 i 5,

$\bar{X}_r$  - srednja vrijednost očitavanja u nizovima sa rotacijom:

$$\bar{X}_r = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$$

- relativna pogreška ponovljivosti bez rotacije ( $b'$ ):

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\bar{X}_{wr}} \right| \times 100$$

gdje je:

$X_1$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 1,

$X_2$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 2,

$\bar{X}_{wr}$  - srednja vrijednost očitavanja u nizovima bez rotacije:

$$\bar{X}_{wr} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

- relativno interpolacijsko odstupanje ( $f_c$ ):

$$f_c = \frac{X_r - X_a}{X_a} \times 100$$



gdje je:

$X_r$  - srednja vrijednost očitavanja u nizovima sa rotacijom,

$X_a$  - interpolirana vrijednost

- relativno odstupanje nul vrijednosti ( $f_o$ ):

$$f_o = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100$$

gdje je:

$i_f$  - vrijednost očitana nakon rasterećenja,

$i_0$  - vrijednost očitana prije opterećenja,

$X_N$  - vrijednost očitana pri maksimalnoj sili umjeravanja

- relativna pogreška histereze ( $v$ ):

$$v_1 = \left[ \left( \left| \frac{X_4' - X_3}{X_3} \right| + \left| \frac{X_6' - X_5}{X_5} \right| \right) : 2 \right] \times 100$$

gdje je:

$X_4'$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 4' padajućih ispitnih sila,

$X_3$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 3 rastućih ispitnih sila,

$X_6'$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 6' padajućih ispitnih sila,

$X_5$  - vrijednost očitana u mjernom nizu 5 rastućih ispitnih sila.

Pogreške obnovljivosti, ponovljivosti, interpolacije i histereze izračunate su za svaku mjernu točku i položaj dinamometra kako je to navedeno u tablici 16. Budući da se relativno interpolacijsko odstupanje računa na temelju interpolirane vrijednosti potrebno je odrediti interpolacijske jednadžbe u obliku polinoma 3. stupnja za svaki ugradbeni položaj. Ove interpolacijske jednadžbe općenitog oblika  $X_a = A \cdot F^3 + B \cdot F^2 + C \cdot F$  određuju ovisnost između mjernog signala i vrijednosti sile. Koeficijenti jednadžbi umjeravanja za različite pozicije dinamometra (centar, A, B, C i D) dani su u tablici 14.

Tablica 14. Koeficijenti interpolacijskih jednadžbi

Položaj	Koeficijenti jednadžbe umjeravanja	Položaj	Koeficijenti jednadžbe umjeravanja
Centar	A=-5,1544563482E-12 B=4,0307985517E-09 C=3,9971220418E-03	C	A=9,3874081973E-12 B=-1,8173324441E-08 C=4,0021656291E-03
A	A=6,1530238056E-12 B=-1,1344266884E-08 C=3,9997627506E-03	D	A=1,0949284800E-10 B=-1,1562699547E-07 C=4,0095049417E-03
B	A=-2,7336522413E-13 B=-7,5059764979E-09 C=4,0001063259E-03		

Vrijednosti pogreške nule određene su za svako predopterećenje i mjerni niz pri različitim pozicijama dinamometra, tablica 15. Za određen položaj u obzir je uzeta najveća vrijednost ove pogreške.

Tablica 15. Vrijednosti relativne pogreške nule

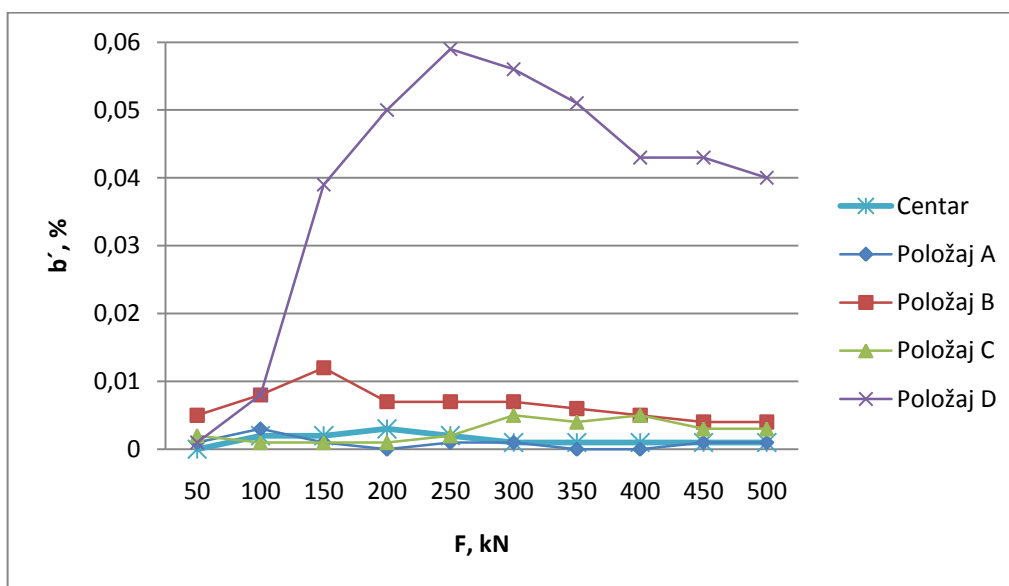
Položaj	Predopterećenje/ mjerni niz	$f_o$ , %	Položaj	Predopterećenje/ mjerni niz	$f_o$ , %
Centar	I	0,00050	C	I	0,00085
	II	-0,00045		II	0,00050
	III	-0,00095		III	0,00040
	X <sub>1</sub>	-0,00065		X <sub>1</sub>	0,00120
	X <sub>2</sub>	0,00025		X <sub>2</sub>	0,00085
	X <sub>3</sub> /X <sub>4</sub>	0,00155		X <sub>3</sub> /X <sub>4</sub>	0,00230
	X <sub>5</sub> /X <sub>6</sub>	0,00165		X <sub>5</sub> /X <sub>6</sub>	0,00255
A	I	0,00095	D	I	0,00020
	II	0,00025		II	0,00060
	III	0,00100		III	0,00025
	X <sub>1</sub>	0,00130		X <sub>1</sub>	0,00131
	X <sub>2</sub>	0,00125		X <sub>2</sub>	0,00171
	X <sub>3</sub> /X <sub>4</sub>	0,00265		X <sub>3</sub> /X <sub>4</sub>	0,00256
	X <sub>5</sub> /X <sub>6</sub>	0,00205		X <sub>5</sub> /X <sub>6</sub>	0,00256
B	I	0,00090			
	II	0,00070			
	III	0,00035			
	X <sub>1</sub>	0,00140			
	X <sub>2</sub>	0,00090			
	X <sub>3</sub> /X <sub>4</sub>	0,00275			
	X <sub>5</sub> /X <sub>6</sub>	0,00190			

Tablica 16. Pogreške posredničkog etalona, klasa i mjerna nesigurnost

Položaj	F, kN	b, %	b', %	v, %	f <sub>c</sub> , %	f <sub>a</sub> , %	Klasa	W, %
Centar	50	0,000	0,010	0,151	-0,024	0,00165	1	0,103
	100	0,002	0,009	0,093	-0,031		0,5	0,076
	150	0,002	0,008	0,024	0,016		00	0,053
	200	0,003	0,008	0,018	0,005		00	0,052
	250	0,002	0,005	0,020	0,001		00	0,052
	300	0,001	0,004	0,014	0,000		00	0,051
	350	0,001	0,004	0,011	-0,002		00	0,051
	400	0,001	0,003	0,007	0,000		00	0,050
	450	0,001	0,003	0,003	-0,002		00	0,050
	500	0,001	0,003	-	0,002		00	0,050
A	50	0,001	0,013	0,204	-0,024	0,00265	1	0,134
	100	0,003	0,029	0,059	0,002		0,5	0,064
	150	0,001	0,009	0,024	0,005		00	0,053
	200	0,000	0,007	0,018	-0,001		00	0,051
	250	0,001	0,005	0,014	0,000		00	0,051
	300	0,001	0,003	0,011	0,001		00	0,051
	350	0,000	0,002	0,008	0,000		00	0,050
	400	0,000	0,002	0,006	-0,001		00	0,050
	450	0,001	0,003	0,003	0,000		00	0,050
	500	0,001	0,003	-	0,000		00	0,050
B	50	0,005	0,041	0,274	-0,063	0,00275	1	0,172
	100	0,008	0,030	0,125	-0,033		0,5	0,092
	150	0,012	0,033	0,020	0,026		0,5	0,058
	200	0,007	0,024	0,016	0,004		00	0,054
	250	0,007	0,020	0,012	0,004		00	0,053
	300	0,007	0,019	0,010	-0,001		00	0,052
	350	0,006	0,017	0,008	-0,003		00	0,052
	400	0,005	0,015	0,006	-0,001		00	0,052
	450	0,004	0,013	0,003	-0,001		00	0,051
	500	0,004	0,012	-	0,002		00	0,051
C	50	0,002	0,017	0,362	-0,114	0,00255	2	0,225
	100	0,001	0,011	0,144	-0,043		0,5	0,101
	150	0,001	0,022	0,018	0,031		0,5	0,055
	200	0,001	0,013	0,016	0,013		00	0,052
	250	0,002	0,006	0,028	0,009		00	0,053
	300	0,005	0,017	0,090	-0,004		0,5	0,080
	350	0,004	0,027	0,144	-0,010		0,5	0,101
	400	0,005	0,043	0,170	0,000		1	0,115
	450	0,003	0,053	0,192	0,001		1	0,128
	500	0,003	0,059	-	0,001		1	0,065
D	50	0,001	0,022	0,535	-0,201	0,00256	-	0,342
	100	0,008	0,083	0,149	0,033		1	0,118
	150	0,039	0,069	0,348	0,072		2	0,237
	200	0,050	0,020	0,706	-0,008		-	0,425
	250	0,059	0,039	0,903	-0,026		-	0,561
	300	0,056	0,044	0,998	-0,013		-	0,614
	350	0,051	0,048	1,056	0,004		-	0,642
	400	0,043	0,051	1,087	0,010		-	0,659
	450	0,043	0,057	1,053	0,004		-	0,638
	500	0,040	0,065	-	-0,005		-	0,072

Temeljem vrijednosti pogrešaka koje predstavljaju klasifikacijske kriterije određena je klasa posredničkog etalona Z4A/500 kN za svaku mjernu točku na svakom od pet ugradbenih položaja. Oznake klase s pripadajućom mjernom nesigurnošću prikazane su u tablici 16.

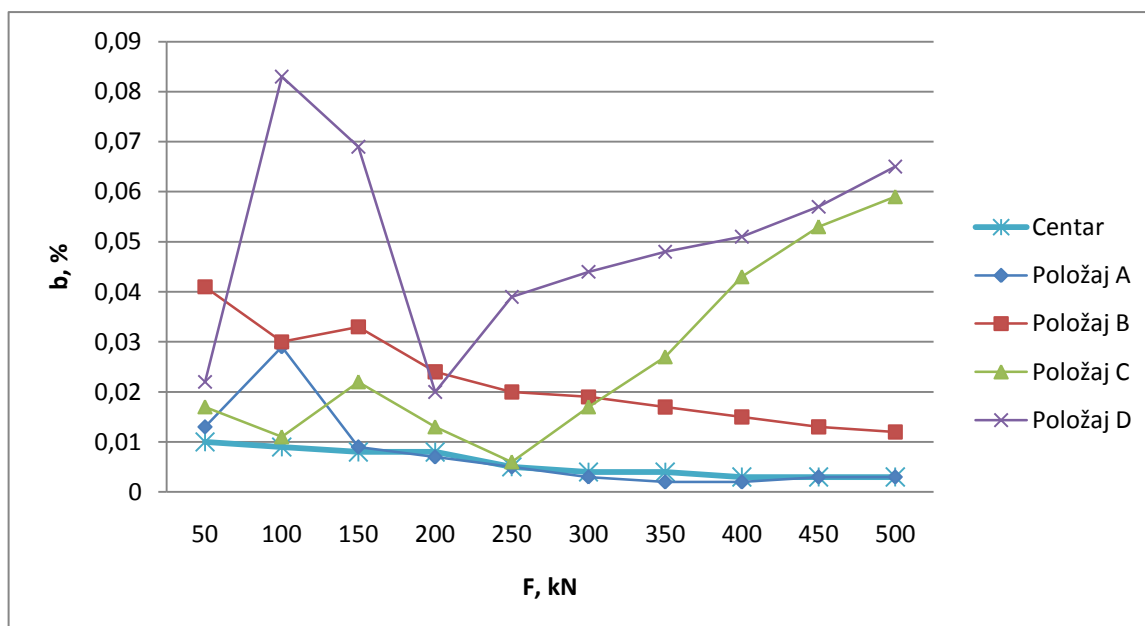
Na slikama koje slijede 54 do 58 predložena je ovisnost pojedinih pogrešaka o ispitnoj sili unutar područja 0 do 500 kN za različite pozicije dinamometra. Slika 54 opisuje relativnu pogrešku ponovljivosti ( $b'$ ) u nizovima bez rotacije.



Slika 54. Relativna pogreška ponovljivosti u nizovima bez rotacije

Uspoređujući vrijednosti relativne pogreške ponovljivosti za različite ugradbene položaje vidljivo je da su razlike minimalne, osim za položaj D gdje su vrijednosti ove pogreške značajno veće nego u ostalim pozicijama. Pogreška ponovljivosti za ovaj položaj dostiže maksimalnu vrijednost od 0,059% pri ispitnoj sili 250 kN nakon čega lagano pada. Vrijednosti pogreške  $b'$  za ostale pozicije su vrlo niske i u principu manje od 0,01% unutar cijelog ispitivanog područja.

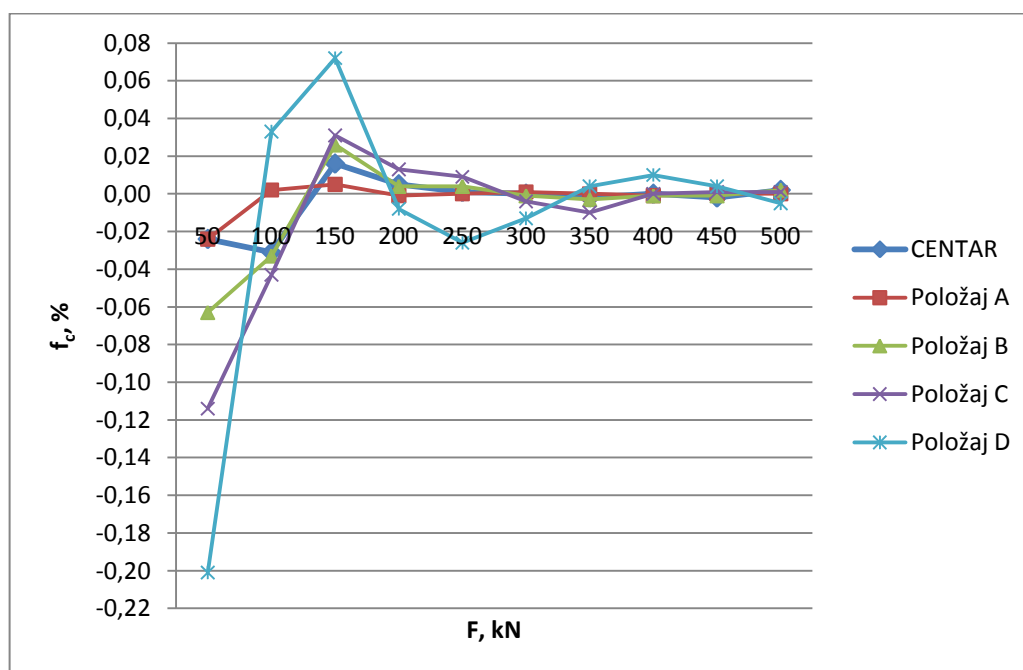
Na slici 55 prikazana je relativna pogreška obnovljivosti ( $b$ ) u nizovima sa rotacijom u ovisnosti o ispitnoj sili pri različitim položajima dinamometra.



Slika 55. Relativna pogreška obnovljivosti u nizovima sa rotacijom

Očito je da se porastom ispitne sile vrijednost pogreške obnovljivosti smanjuje kada je riječ o položajima centar, A i B. Iz slike jasno proizlazi da se krivulje za centar i položaj A gotovo preklapaju. Za položaj C pogreška obnovljivosti pada, ali samo do vrijednosti sile 250 kN nakon čega kontinuirano raste povećanjem sile. U položaju D trend promjene je vrlo nepravilan jer pogreška naglo raste već na drugoj mjernoj točki 100 kN, da bi potom padala kako se sila približava 200 kN i zatim ponovo rasla.

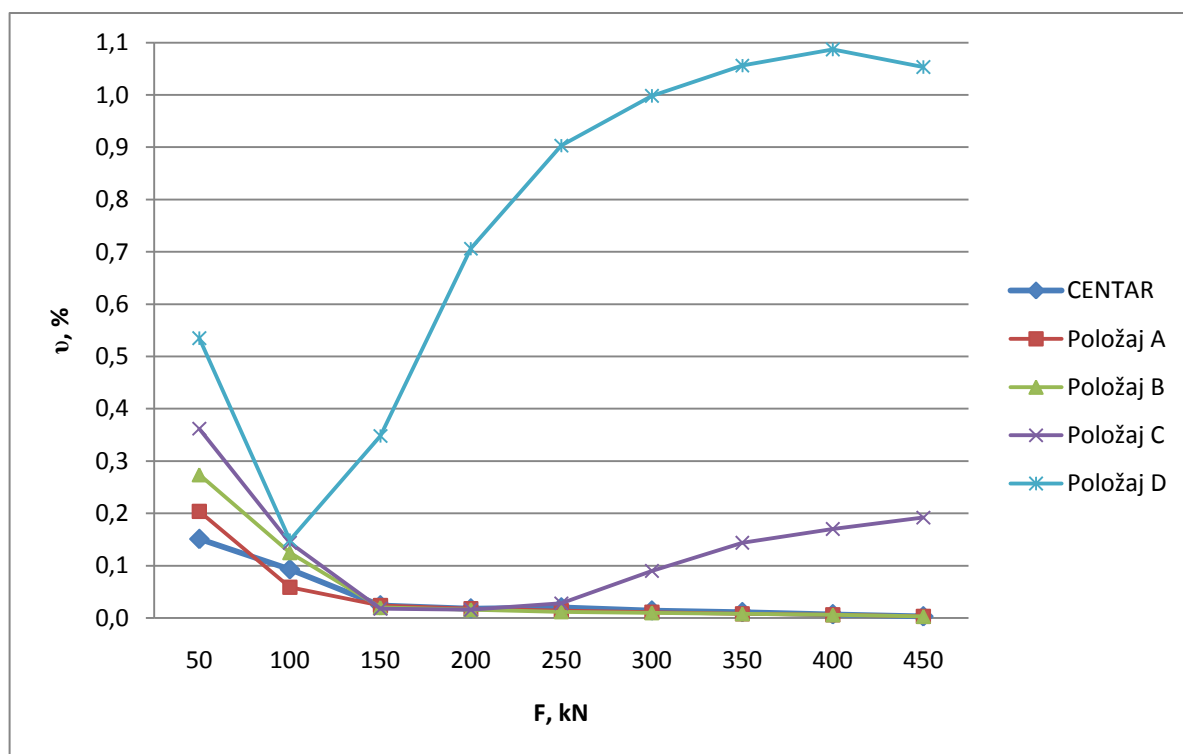
Relativno interpolacijsko odstupanje ( $f_c$ ) pri različitim ugradbenim pozicijama ilustrirano je slikom 56.



Slika 56. Relativno interpolacijsko odstupanje

Iz grafičkog prikaza je vidljivo da su najveće vrijednosti relativnog interpolacijskog odstupanja zabilježene za položaj D, osobito ako se radi o nižim ispitnim silama. Vrijednosti ove pogreške i u ostalim položajima najveće su na prve tri mjerne točke nakon čega padaju.

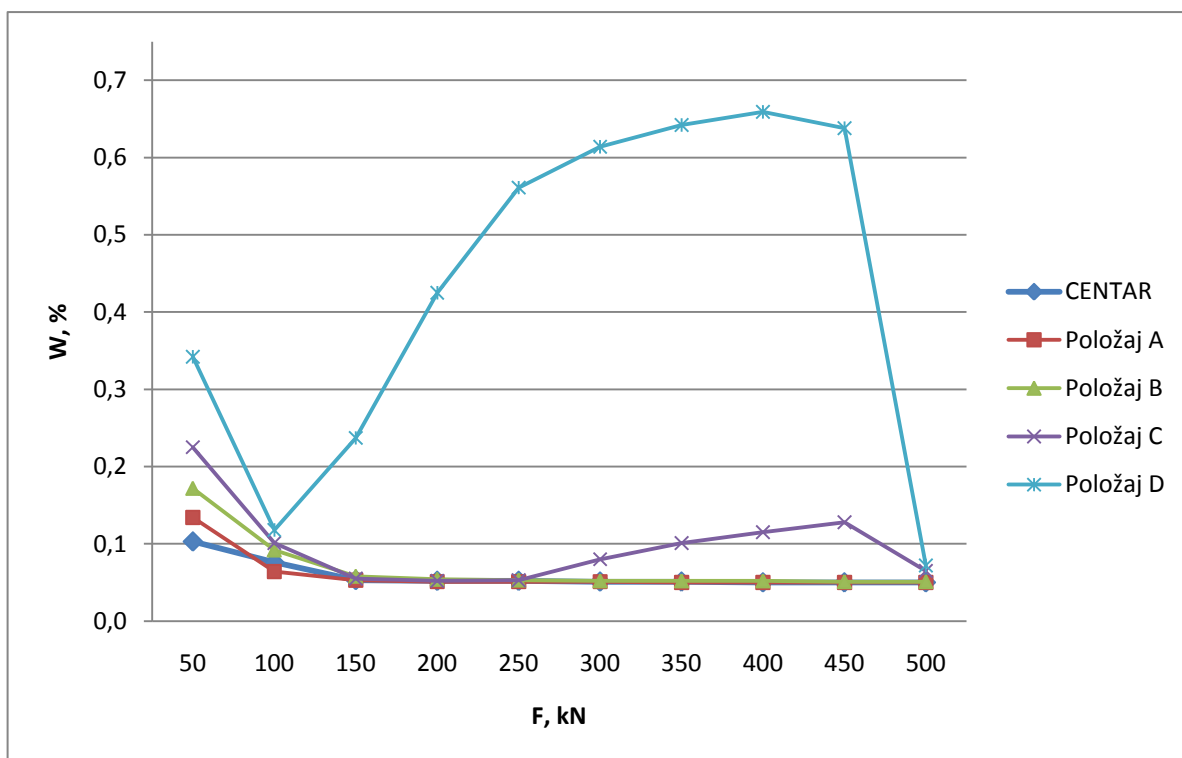
Slika 57 predočava relativnu pogrešku histereze ( $v$ ) u ovisnosti o sili također za svih pet ispitnih položaja.



Slika 57. Relativna pogreška histereze

Može se primijetiti da kako sila raste relativna pogreška histereze postaje sve manja kada se radi o pozicijama centar, A i B. Za položaj C je karakteristično da pogreška histereze raste nakon točke 250 kN, ali njen uzlazni trend nije tako nagli kao u položaju D kada ova pogreška prelazi 0,5% što je maksimalno dozvoljena vrijednost za najlošiju klasu 2. Zbog toga se dinamometar u ovom položaju ne može niti klasificirati.

Mjerna nesigurnost ( $W$ ) u ovisnosti o sili za razmatrane pozicije dinamometra prikazana je slikom 58.



Slika 58. Mjerna nesigurnost

Vrijednosti mjerne nesigurnosti u principu se smanjuju porastom ispitne sile, osim kada se radi o položaju C i D. Rezultati mjerne nesigurnosti za položaj C pokazuju da ona raste u području sila između 250 kN i 450 kN. Daleko najlošiji rezultati zabilježeni su za položaj D posebno pri višim mjernim točkama kada nesigurnost doseže 0,66%.

## 8. ZAKLJUČAK

Vrijednosti opterećenja na referentnom etalonu sile izmjerene u položajima centar, A, B, C pri rastućoj ispitnoj sili približno su jednake po točkama umjeravanja za cijelo ispitivano područje 0 do 500 kN. Za ove položaje odstupanja sile u odnosu na centar vrlo su mala i kreću se u rasponu od svega -0,061 % do +0,066%. Slična je situacija usporede li se vrijednosti sile izmjerene na ovim položajima sa referentnim signalom. Sile izmjerene u rastućim nizovima, ali na položaju D značajno se razlikuju od vrijednosti zabilježenih u ostalim položajima što je posebno istaknuto pri višim mjernim točkama iznad 150 kN. Ne samo što su vrijednosti sile za ovaj položaj manje nego u ostalim pozicijama već su niže i od referentnih tako da se postotno odstupanje povećava prema kraju mjernog područja.

Što se tiče sile izmjerene u padajućim nizovima za različite ugradbene položaje ona je u svih pet ispitnih pozicija veća od tražene referentne vrijednosti, a osobito u poziciji C pri mjernim točkama iznad 250 kN te na položaju D unutar cijelog ispitivanog područja. Vrijednosti sile na položaju C u padajućem nizu izmjerene na mjernim točkama 300 kN, 350 kN, 400 kN i 450 kN veće su od onih u centru, položaju A odnosno B. Sile u padajućem nizu na položaju D značajno nadmašuju vrijednosti za ostale položaje, pa čak i u odnosu na položaj C.

Ovakve promjene sile u rastućim i padajućim nizovima za različite ugradbene položaje uzrokuju variranje karakterističnih pogrešaka posredničkog etalona. Posebno je to izraženo kod položaja D i to na svim mjernim točkama unutar ispitivanog mjerenog područja te u nešto manjoj mjeri i položaja C pri silama većim od 250 kN kada su vrijednosti pogrešaka ponovljivosti, obnovljivosti i histereze značajno veće nego za ostale ugradbene pozicije. U ovim položajima vrijednosti navedenih pogrešaka rastu povećanjem ispitne sile. Što se tiče pogreške interpolacije ona je također najveća na položaju D i to osobito pri nižim mjernim točkama do 200 kN. Za ostale ugradbene položaje: centar, A i B vrijednosti pogrešaka ponovljivosti i obnovljivosti vrlo su bliske i na svim mjernim točkama manje od 0,04 % dok je pogreška interpolacije jednako kao i pogreška histereze najveća na prvoj mjernoj točki 50 kN da bi se zatim njihove vrijednosti kontinuirano smanjivale prema kraju mjernog područja.



## 9. LITERATURA

- [1] [http://hr.wikipedia.org/wiki/Newtonovi\\_zakoni\\_gibanja](http://hr.wikipedia.org/wiki/Newtonovi_zakoni_gibanja)
- [2] [http://www.mojeinstrukcije.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=3519:newtonovi-zakoni-mehanike&catid=114&Itemid=138](http://www.mojeinstrukcije.com/index.php?option=com_content&view=article&id=3519:newtonovi-zakoni-mehanike&catid=114&Itemid=138)
- [3] <http://bs.wikipedia.org/wiki/Sila>
- [4] [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_elek/elektrotehnika/nastava/velel/mue/download/predavanja/02%20Mjernja%20nesigurnost%20i%20pogreske.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_elek/elektrotehnika/nastava/velel/mue/download/predavanja/02%20Mjernja%20nesigurnost%20i%20pogreske.pdf)
- [5] [www.dzm.hr/\\_download/repository/REFMAT.pdf](http://www.dzm.hr/_download/repository/REFMAT.pdf)
- [6] <http://www.fsb.hr/library/fileopen.php?id=198>
- [7] [www.dzm.hr/\\_download/repository/REFMAT.pdf](http://www.dzm.hr/_download/repository/REFMAT.pdf)
- [8] [hrcak.srce.hr/file/2488](http://hrcak.srce.hr/file/2488)
- [9] [http://www.dzm.hr/\\_download/repository/Metrologija\\_ukratko.pdf](http://www.dzm.hr/_download/repository/Metrologija_ukratko.pdf)
- [10] [http://www.fkit.hr/files/nastava/zmavp/MAVP\\_06-07\\_Mjerenje\\_Metrologija.pdf](http://www.fkit.hr/files/nastava/zmavp/MAVP_06-07_Mjerenje_Metrologija.pdf)
- [11] Ž. Alar, M. Franz, Mjerna sljedivost opreme za mjerenje sile u R. Hrvatskoj
- [12] [http://www.fsb.hr/atlantis/upload/newsboard/17\\_06\\_2008\\_9070\\_DOKTORAT\\_Alar.pdf](http://www.fsb.hr/atlantis/upload/newsboard/17_06_2008_9070_DOKTORAT_Alar.pdf)
- [13] [http://www.fsb.hr/zavod\\_za\\_materijale/index.php?menu=20&action=1](http://www.fsb.hr/zavod_za_materijale/index.php?menu=20&action=1)
- [14] [http://www.dzm.hr/znanstveno\\_mjeriteljstvo/nacionalni\\_umjerni\\_laboratoriji/sila/sljedivost\\_lims-a](http://www.dzm.hr/znanstveno_mjeriteljstvo/nacionalni_umjerni_laboratoriji/sila/sljedivost_lims-a)
- [15] S. Mahović: Teorija i tehnika mjerenja, podloge sa predavanja, FSB, ak.god. 2006/2007.
- [16] [http://www.dzm.hr/\\_download/repository/Metrologija\\_ukratko.pdf](http://www.dzm.hr/_download/repository/Metrologija_ukratko.pdf)
- [17] [www.met.gov.ba/Aktuelno/MetShort3\\_BH\\_A5\\_v2.pdf](http://www.met.gov.ba/Aktuelno/MetShort3_BH_A5_v2.pdf)
- [18] [http://w14.itrademarket.com/pdimage/11/750911\\_rajaloadcell.jpg](http://w14.itrademarket.com/pdimage/11/750911_rajaloadcell.jpg)
- [19] [http://www.sfsb.hr/ksk/statika/cvrstoca/N\\_eksperiment/N\\_d.pdf](http://www.sfsb.hr/ksk/statika/cvrstoca/N_eksperiment/N_d.pdf)
- [20] J. Božičević, Temelji automatike 2, Mjerni pretvornici i mjerenje, Zagreb, 1991.
- [21] [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_elek/elektrotehnika/nastava/velel/mue/download/predavanja/05%20Mjerna%20pojacala.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_elek/elektrotehnika/nastava/velel/mue/download/predavanja/05%20Mjerna%20pojacala.pdf)
- [22] [12tesla.phy.hr/elprakt/materijali/9.pdf](http://12tesla.phy.hr/elprakt/materijali/9.pdf)
- [23] A. Šantić, Elektronička instrumentacija, Zagreb, 1993.
- [24] ISO 376: Metallic materials – Calibration of force – proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines, 2004.
- [25] T. Aleksandrov: Work instruction for estimating and calculation of measurement uncertainty of force-proving instruments calibration, issue 01, Zagreb, 2009.

**PRILOG I. Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN za položaj A**

Tablica 17. Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u položaju A

	0°	120°	240°
Očitanje prije primjene sile, mV/V	0,000000	0,000000	0,000000
Očitanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,997701	1,997557	1,997785
Očitanje nakon rasterećenja, mV/V	0,000019	0,000005	0,000002

Tablica 18. Rezultati umjeravanja za dinamometar u položaju A

F, kN	Isti ugradbeni položaj 0°		Različiti ugradbeni položaji			
	X <sub>1</sub> , mV/V	X <sub>2</sub> , mV/V	120°		240°	
			X <sub>3</sub> , mV/V	X <sub>4</sub> ', mV/V	X <sub>5</sub> , mV/V	X <sub>6</sub> ', mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
50	0,199896	0,199899	0,199920	0,200306	0,199923	0,200351
100	0,399813	0,399825	0,399886	0,400125	0,399928	0,400160
150	0,599737	0,599730	0,599744	0,599894	0,599793	0,599935
200	0,799514	0,799515	0,799531	0,799670	0,799572	0,799718
250	0,999303	0,999293	0,999311	0,999449	0,999356	0,999494
300	1,199070	1,199057	1,199079	1,199201	1,199107	1,199251
350	1,398785	1,398781	1,398782	1,398889	1,398810	1,398931
400	1,598472	1,598465	1,598458	1,598539	1,598483	1,598581
450	1,798172	1,798148	1,798121	1,798179	1,798166	1,798214
500	1,997849	1,997827	1,997789	-	1,997825	-
0	0,000026	0,000025	-	0,000053	-	0,000041

**PRILOG II. Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN za položaj B**

Tablica 19. Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u položaju B

	0°	120°	240°
Očitavanje prije primjene sile, mV/V	0,000000	0,000000	0,000000
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,998087	1,998299	1,998248
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,000018	0,000014	0,000007

Tablica 20. Rezultati umjeravanja za dinamometar u položaju B

F, kN	Isti ugradbeni položaj 0°		Različiti ugradbeni položaji			
	X <sub>1</sub> , mV/V	X <sub>2</sub> , mV/V	120°		240°	
			X <sub>3</sub> , mV/V	X <sub>4</sub> ', mV/V	X <sub>5</sub> , mV/V	X <sub>6</sub> ', mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
50	0,199827	0,199836	0,199909	0,200463	0,199848	0,200390
100	0,399811	0,399779	0,399856	0,400348	0,399736	0,400241
150	0,600082	0,600011	0,600032	0,600151	0,599886	0,600009
200	0,799823	0,799766	0,799798	0,799932	0,799627	0,799755
250	0,999658	0,999584	0,999663	0,999779	0,999460	0,999579
300	1,199398	1,199319	1,199418	1,199536	1,199194	1,199318
350	1,399117	1,399033	1,399147	1,399256	1,398911	1,399028
400	1,598870	1,598785	1,598906	1,598990	1,598660	1,598763
450	1,798528	1,798454	1,798574	1,798616	1,798333	1,798384
500	1,998225	1,998151	1,998266	-	1,998035	-
0	0,000028	0,000018	-	0,000055	-	0,000038

### PRILOG III. Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN za položaj C

Tablica 21. Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u položaju C

	0°	120°	240°
Očitavanje prije primjene sile, mV/V	0,000000	0,000000	0,000000
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,996516	1,997686	1,997953
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,000017	0,000010	0,000008

Tablica 22. Rezultati umjeravanja za dinamometar u položaju C

F, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaji			
	0°		120°		240°	
	X <sub>1</sub> , mV/V	X <sub>2</sub> , mV/V	X <sub>3</sub> , mV/V	X <sub>4</sub> ', mV/V	X <sub>5</sub> , mV/V	X <sub>6</sub> ', mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
50	0,199821	0,199818	0,199833	0,200541	0,199855	0,200594
100	0,399854	0,399850	0,399862	0,400423	0,399899	0,400488
150	0,600071	0,600066	0,600132	0,600239	0,600201	0,600309
200	0,799832	0,799821	0,799874	0,800012	0,799940	0,800065
250	0,999606	0,999584	0,999670	0,999934	0,999655	0,999945
300	1,199127	1,199068	1,199211	1,200481	1,199336	1,200218
350	1,398956	1,398906	1,398847	1,400902	1,398573	1,400555
400	1,598867	1,598792	1,598641	1,601363	1,598174	1,600880
450	1,798605	1,798556	1,798249	1,801741	1,797657	1,801065
500	1,998284	1,998233	1,997819	-	1,997100	-
0	0,000024	0,000017	-	0,000046	-	0,000051

# **PRILOG IV. Rezultati umjeravanja posredničkog etalona Z4A/500 kN za položaj D**

Tablica 23. Izmjerene vrijednosti kod predopterećenja za dinamometar u položaju D

	0°	120°	240°
Očitavanje prije primjene sile, mV/V	0,000000	0,000000	0,000000
Očitavanje kod nazivne vrijednosti, mV/V	1,992460	1,991836	1,990760
Očitavanje nakon rasterećenja, mV/V	0,000004	0,000012	0,000005

Tablica 24. Rezultati umjeravanja za dinamometar u položaju D

F, kN	Isti ugradbeni položaj		Različiti ugradbeni položaji			
	0°		120°		240°	
	X <sub>1</sub> , mV/V	X <sub>2</sub> , mV/V	X <sub>3</sub> , mV/V	X <sub>4</sub> ', mV/V	X <sub>5</sub> , mV/V	X <sub>6</sub> ', mV/V
0	0,000000	0,000000	0,000000	-	0,000000	-
50	0,199819	0,199817	0,199798	0,200934	0,199775	0,200775
100	0,400205	0,400171	0,400030	0,400639	0,399875	0,400460
150	0,599597	0,599361	0,599430	0,601747	0,599841	0,601694
200	0,798017	0,797616	0,798081	0,803533	0,798175	0,803991
250	0,996701	0,996117	0,996744	1,005133	0,996359	1,005965
300	1,195474	1,194801	1,195305	1,206544	1,194948	1,207573
350	1,394296	1,393580	1,393806	1,407815	1,393624	1,409046
400	1,592978	1,592295	1,592251	1,608771	1,592167	1,610251
450	1,791584	1,790809	1,790587	1,808628	1,790568	1,810236
500	1,990234	1,989443	1,989142	-	1,988945	-
0	0,000026	0,000034	-	0,000051	-	0,000051